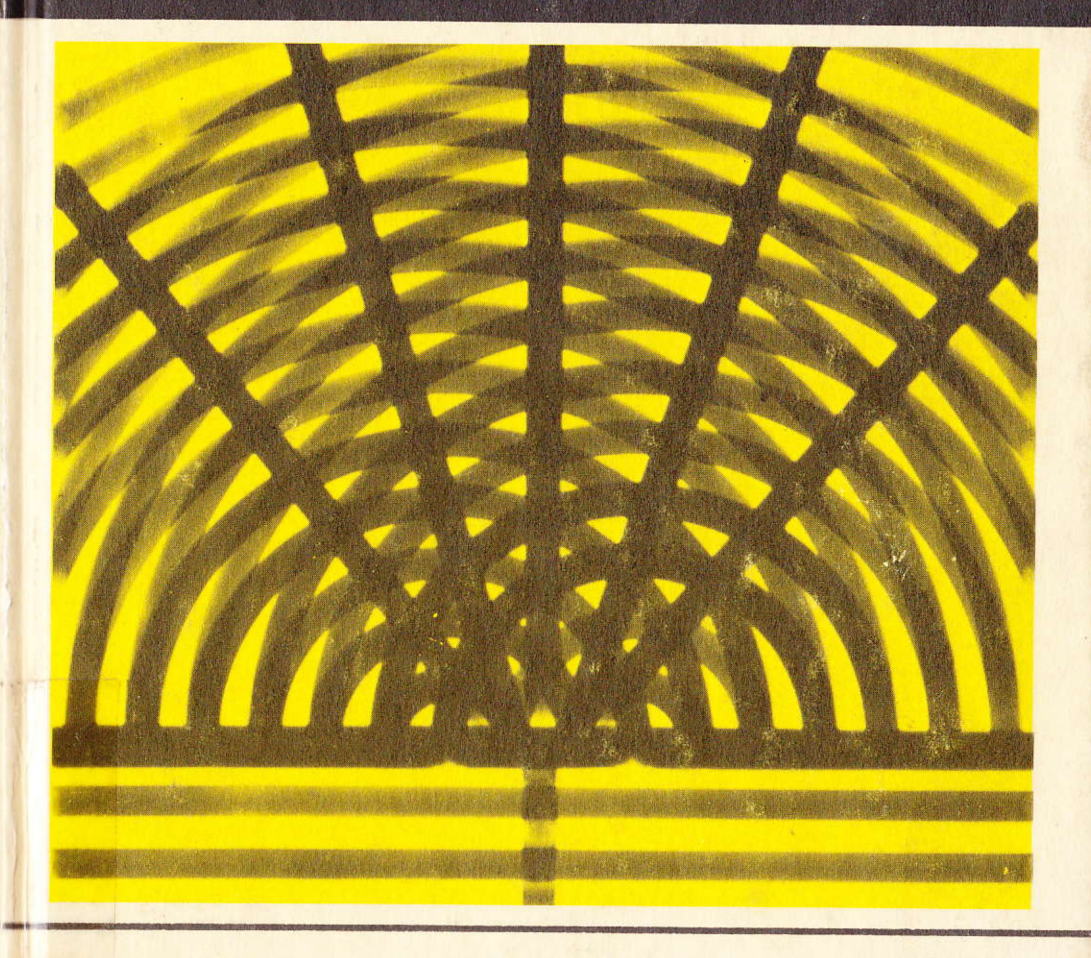
Deutsch komplex

Physik

zur Studienvorbereitung für Ausländer



KARL-MARX-UNIVERSITÄT LEIPZIG · Herder-Institut

Deutsch komplex

Physik

Aufbaukurs

zur Studienvorbereitung für Ausländer

VEB Verlag Enzyklopädie Leipzig

Autorenkollektiv: Siegfried Anders, Stefan Köpf, Arwed Kramer, Siegfried Schmidt, Manfred Pudszuhn

Leitung: Manfred Pudszuhn

Gesamtleitung „Deutsch komplex“: Fritz Kempter


D-Le 411,20

Deutsch komplex : Aufbaukurs zur Studienvorbereitung für Ausländer / Karl-Marx-Univ. Leipzig, Herder-Inst. – Leipzig : Verlag Enzyklopädie
Physik. – 4., unveränd. Aufl. – 1987. – 456 S. : 275 Ill. u. graph. Darst. & Wörterverz. (19 S.)
ISBN 3-324-00181-1
NE: Herder-Institut ⟨Leipzig⟩

ISBN 3-324-00181-1

4., unveränderte Auflage
© VEB Verlag Enzyklopädie Leipzig, 1987
Verlagslizenz Nr. 434 – 130/129/87
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig, Betrieb der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/97
Zeichnungen: Matthias Weis, Leipzig
Einbandgestaltung: Rolf Kunze, Großpösna
LSV 0814
Best.-Nr.: 577 026 0
01980

Vorwort

Das vorliegende Lehrbuch ist Teil eines komplexen Sprachlehrganges, der aus folgenden Teilen besteht:

Deutsch komplex – Allgemeinsprache
Deutsch komplex – Mathematik
Deutsch komplex – Physik
Deutsch komplex – Chemie
Deutsch komplex – Biologie
Deutsch komplex – Gesellschaftswissenschaftlicher Grundkurs

Der komplexe Sprachlehrgang ist in erster Linie für Deutschlernende gedacht, die sich innerhalb und außerhalb der DDR auf ein Studium an einer Universität, Hochschule oder Ingenieurschule vorbereiten und deshalb allgemeinsprachliches und fachsprachliches Wissen und Können brauchen.

Voraussetzung für ein erfolgreiches Lernen mit einem oder mehreren Teilen des komplexen Sprachlehrganges ist, daß entweder das Lehrbuch „Deutsch intensiv, Grundkurs für Ausländer“, VEB Verlag Enzyklopädie Leipzig oder ein ähnliches Sprachlehrbuch durchgearbeitet wurde.

Die fachsprachlichen Teile sind mit dem allgemeinsprachlichen Teil bezüglich der Grammatik, Lexik und Wortbildung koordiniert. Deshalb empfiehlt sich für den Benutzer eines fachsprachlichen Teils ein etwa paralleles Arbeiten mit dem allgemeinsprachlichen Teil.

Bei entsprechendem Sprachstand des Lernenden kann jeder einzelne Teil des Sprachlehrganges für sich allein benutzt werden.

Der Teil „Deutsch komplex – Physik“ als ein in sich geschlossenes Lehrbuch hat die Aufgabe, im Zusammenhang mit der Darlegung physikalischer Sachverhalte und der Entwicklung physikalischen Könnens in die deutsche Fachsprache der Physik einzuführen und dabei ein angemessenes rezeptives und produktives Sprachvermögen zu entwickeln.

Aus dieser Aufgabenstellung ergeben sich die Auswahl, die Anordnung und der Aufbereitungsgrad der physikalischen Inhalte und des sprachlichen Materials des Lehrbuches. Die Texte sind so verfaßt, daß die sprachlichen Anforderungen allmählich ansteigen und fachsystematische Gesichtspunkte berücksichtigt werden.

Besondere Aufmerksamkeit wurde den „Übungen und Aufgaben“, die zu jedem Text gehören, gewidmet. Sie sollen in Verbindung mit der Vertiefung von physikalischem Wissen und Können die für ein Fachstudium notwendigen kommunikativen Tätigkeiten entwickeln. Die kommunikativ orientierten „Übungen und Aufgaben“ sollen gleichzeitig die Lexik und solche sprachliche Strukturen, die in der Fachsprache besonders wichtig sind, systematisieren und automatisieren. So dienen die „Kontrollfragen zum Text“ der unmittelbaren Kontrolle des Textverständnisses, die „Übungen zum Text“ und die „Übungen zum Thema“ der weiteren Festigung und Anwendung der fachlichen und sprachlichen Inhalte der Texte. Die „Textaufgaben“ mit dem dazugehörenden Lösungsteil sollen die Fähigkeit des Lösens spezieller physikalischer Aufgaben entwickeln.

Die in den Übungen ausgewiesenen sprachlichen Schwerpunkte orientieren den Be-

nutzer auf wichtige sprachliche Strukturen und Besonderheiten der Fachsprache. Darüber hinaus werden in vier Komplexen von zusammenfassenden Übungen wesentliche sprachliche Erscheinungen der Fachsprache der Physik dargestellt, bewußtgemacht und durch zahlreiche Übungen gefestigt.
„Deutsch komplex – Physik" wendet sich insbesondere an Leser, die sich intensiv auf ein Studium in der DDR in einer technisch-naturwissenschaftlichen, medizinischen, landwirtschaftlichen oder wirtschaftswissenschaftlichen Fachrichtung vorbereiten wollen.
Als Benutzer kommen weiterhin ausländische Wissenschaftler, Ingenieure, Lehrer usw. in Betracht, die beispielsweise das Lesen mathematisch-naturwissenschaftlicher Literatur in deutscher Sprache beabsichtigen.
Wir danken an dieser Stelle den Kolleginnen und Kollegen des Herder-Instituts der Karl-Marx-Universität Leipzig, deren jahrzehntelange Erfahrungen in dieses Buch eingegangen sind. Ihre Hinweise, die sie im Ergebnis mehrjähriger Unterrichtserprobung gaben, haben uns bei der Erarbeitung des Lehrbuches sehr geholfen.
Wir wünschen allen, die mit diesem Buch arbeiten, viel Erfolg. Für Zuschriften, die über die Arbeit mit diesem Buch berichten, für Hinweise und Kritiken sind wir dankbar.

Leipzig, im Sommer 1979 — Die Autoren

Hinweise für den Benutzer

Das Lehrbuch gliedert sich in 6 Kapitel. Jedes dieser Kapitel ist in Texte unterteilt, die fortlaufend numeriert sind. Zu jedem Text gehören „Übungen und Aufgaben", die in „Kontrollfragen zum Text", „Übungen zum Text", „Übungen zum Thema" und „Textaufgaben" gegliedert sind. Während sich die „Kontrollfragen zum Text" und „Übungen zum Text" auf den dazugehörigen Text beschränken, gehen die „Übungen zum Thema" darüber hinaus.
Zu jedem der ersten vier Kapitel gibt es „Zusammenfassende Übungen", die zur Wiederholung und Systematisierung sprachlicher Schwerpunkte des Kapitels genutzt werden können.
Die Texte der letzten beiden Kapitel sollen die Benutzer an den Schwierigkeitsgrad von Hochschullehrbüchern heranführen. Die dazugehörigen „Übungen und Aufgaben" konzentrieren sich auf die Entwicklung des Sprechens, die Klärung von Begriffen, die Darstellung und Erörterung von physikalischen Zusammenhängen.
Die Potenzen des Lehrbuches werden am besten genutzt, wenn die Texte in der gegebenen Reihenfolge abgearbeitet werden. Dabei empfiehlt es sich im allgemeinen, zuerst den Text zu lesen und sich dabei an den „Kontrollfragen zum Text" zu orientieren. Nach Beantwortung der Kontrollfragen sollten die „Übungen zum Text" und danach die „Übungen zum Thema" durchgearbeitet werden. Die „Textaufgaben" sind eine Auswahl spezieller physikalischer Aufgaben. Ihre Lösung soll durch zahlreiche Lehrbeispiele in den Texten und ein Lösungsschema erleichtert werden. Die Richtigkeit der Ergebnisse kann durch Vergleich mit den am Ende des Buches angegebenen Lösungen kontrolliert werden.
Für fachlich und sprachlich gut vorgebildete Leser ist es auch möglich, ein Kapitel oder einen Einzeltext außerhalb der Reihenfolge durchzuarbeiten.
Im dritten Kapitel beginnt der Einsatz der Differentialrechnung und im vierten die Verwendung der Integralrechnung.

Die im Buch benutzten Hinweiszeichen haben folgende Bedeutung:

►	sprachliches Beispiel
■	Lehrbeispiel
►	wichtige Sätze und Definitionen
‖	das inhaltlich Passende ist auszuwählen und miteinander zu kombinieren
*	relativ schwierige Textaufgaben

Folgende Abkürzungen werden benutzt:

N	Nominativ
A	Akkusativ
D	Dativ
G	Genitiv

Zu den Vokabeln des Textes:

Die in den Texten neu auftretenden Vokabeln sind alphabetisch geordnet.

Verben:

Bei starken und unregelmäßigen Verben werden die drei Stammformen angegeben.

Beispiel: schmelzen
schmolz, geschmolzen

Bei Verben, die das Perfekt und Plusquamperfekt mit „sein“ bilden, wird dies in Klammern vermerkt.

Beispiel: fallen
fiel, gefallen (sein)

Bei Verben, die einen bestimmten Kasus verlangen, wird dieser mit angegeben.

Beispiel: teilen A

Bei unfest zusammengesetzten Verben werden die beiden Teile durch Schrägstrich kenntlich gemacht.

Beispiel: um/kehren

Das Reflexivpronomen von reflexiv gebrauchten Verben steht hinter dem Infinitiv.

Beispiel: erholen, sich

Steht ein Verb in fester Verbindung mit einer Präposition, so erscheint es zusammen mit dieser Präposition und dem entsprechenden Kasus.

Beispiel: um/wandeln in A
ergeben, sich aus D
ergab, ergeben

In Klammern gesetzte Präpositionen bedeuten, daß sie häufig mit dem betreffenden Verb gebraucht werden.

Beispiel: aus/üben A (auf A)

Substantive:

Es werden der Artikel und die Pluralendung angegeben.

Beispiele:

der Körper, –	die Körper
die Skale, –n	die Skalen
der Dampf, ⸗e	die Dämpfe
die Dehnung, –en	die Dehnungen
das Blei, o.	Das Substantiv hat keinen Plural.
die Realität	Der Plural wird nur selten verwendet oder in anderer als der hier benutzten Bedeutung.

Inhaltsverzeichnis

Wärmelehre

Fortsetzung Elektrik

Anhang

Wärmelehre

1. Die Temperatur

1.1. Der Temperaturbegriff

Wenn man physikalische Vorgänge untersucht, die mit der Erwärmung oder Abkühlung eines Körpers zusammenhängen, braucht man den Begriff ‚Temperatur'. Man kann ihn mit Hilfe der Eigenschaften und der Bewegung der Teilchen des Körpers erklären. Teilchen eines Körpers sind z. B. Atome und Moleküle. Diese Teilchen bewegen sich ständig. Deshalb haben die Teilchen eines Körpers kinetische Energie.
Wenn man einen Körper erwärmt, so bewegen sich seine Teilchen schneller. Deshalb vergrößert sich die kinetische Energie der Teilchen. Die Temperatur des Körpers steigt.

► **Die Temperatur beschreibt den Wärmezustand eines Körpers.
Je größer die Energie der Atome und Moleküle eines Körpers ist, desto höher ist seine Temperatur.**

Wenn man einen Körper abkühlt, so verringert sich die Energie der Teilchen. Die Temperatur des Körpers fällt. Zum kleinsten Wert der Energie der Teilchen gehört die tiefste Temperatur. Die tiefste Temperatur, die theoretisch möglich ist, nennt man den absoluten Nullpunkt.
Für die Temperatur benutzt man die Einheiten Kelvin (K) und Grad Celsius (°C). Man unterscheidet die absolute Temperatur T mit der Einheit 1 K und die Celsiustemperatur ϑ mit der Einheit 1 °C. Die Temperaturdifferenzen ΔT und $\Delta\vartheta$ gibt man in K an.
Die Temperatur ist eine physikalische Größe. Physikalische Größen braucht man zur genauen Beschreibung physikalischer Vorgänge und Zustände.
Jede physikalische Größe ist das Produkt aus einem Zahlenwert und einer Einheit.

Beispiel:

T	$= 305$	K
|	|	|
Größe	Zahlenwert	Einheit

1.2. Temperaturskalen

Zur Angabe von Temperaturen und Temperaturdifferenzen braucht man Temperaturskalen. Solche Temperaturskalen erhält man, wenn man den Abstand zwischen zwei Festpunkten in gleiche Teile teilt. Als Festpunkt kann man z. B. den absoluten Nullpunkt, den Eispunkt und den Dampfpunkt des Wassers benutzen. Bei der *Kelvin*-Temperaturskale wird dem Eispunkt des Wassers die Temperatur 273,15 K und dem Dampfpunkt des Wassers die Temperatur 373,15 K zugeordnet. Bei der *Celsius*-Temperaturskale gehört zum Eispunkt die Temperatur 0 °C und zum Dampfpunkt des Wassers die Temperatur 100 °C (vgl. Abb. 1.1.).

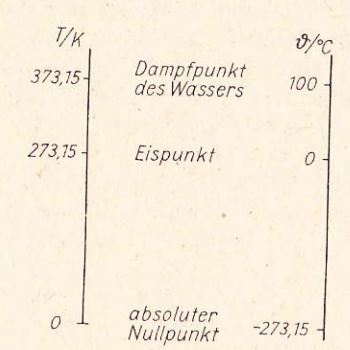


Abb. 1.1. Temperaturskalen

Zwischen der absoluten Temperatur T mit der Einheit 1 *Kelvin* und der *Celsius*temperatur ϑ mit der Einheit 1 Grad Celsius besteht also die Beziehung:

$$\frac{T}{\mathrm{K}} = \frac{\vartheta}{{}^\circ\mathrm{C}} + 273$$

Die Temperatur mißt man mit Thermometern. Es gibt viele Arten von Thermometern. Bekannt sind die Flüssigkeitsthermometer, bei denen als Flüssigkeit Quecksilber oder Alkohol benutzt werden.

Wortliste zum Text

ab/kühlen, (sich) A
die Abkühlung, -en
absolut
der Alkohol
die Angabe, -en
an/geben A
gab an, angegeben
etwas in D (physikalische Einheit) angeben
das Atom, -e
der Begriff, -e
beschreiben A
beschrieb, beschrieben
bewegen, (sich) A
die Bewegung, -en
die Beziehung, -en
der Bezug, ⸗e
in bezug auf A

der Dampf, ⸗e
die Differenz, -en
die Einheit, -en (physikalisch)
die Energie, -n
erwärmen, (sich) A
die Erwärmung, -en
der Festpunkt, -e
flüssig
die Flüssigkeit, -en
das Kelvin, -
kinetisch
der Körper, -
das Molekül, -e
der Nullpunkt, -e
die Physik, o.
physikalisch
das Quecksilber, o.
die Skale, -n
steigen
stieg, gestiegen (sein)
das Teilchen, -
teilen A
etwas in A teilen
der Vorgang, ⸗e
der Zustand, ⸗e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Beziehung besteht zwischen der Temperatur eines Körpers und der Energie seiner Teilchen?
2) Welche Folgen hat die Erwärmung eines Körpers?
3) Wovon hängt die Temperatur eines Körpers ab?
4) Was ist eine physikalische Größe?
5) Welche Temperaturskalen benutzt man in der DDR?
6) Wie erhält man eine Temperaturskale?
7) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der absoluten Temperatur und der *Celsius*temperatur?
8) Womit mißt man Temperaturen?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Erwärmung und die Abkühlung eines Körpers

Ergänzen Sie den Text!

Bei .... bewegen sich die Teilchen schneller.
Bei .... verringert sich die Energie der Teilchen.
Die kinetische Energie der Teilchen vergrößert sich, wenn man einen Körper .... Dabei .... die Temperatur.

steigen
Erwärmung
Abkühlung
erwärmen

Wenn man einen Körper abkühlt, so . . . . die kinetische Energie der Teilchen. Die Temperatur	sich verringern fallen

2.2. Das thermische Verhalten der Körper

zusammen/hängen mit D

Bilden und beantworten Sie Fragen!

► Womit hängt die Abkühlung der Körper zusammen?
► Die Abkühlung der Körper hängt mit der langsameren Bewegung der Moleküle zusammen.
► Mit der langsameren Bewegung der Moleküle.

(1) die Abkühlung der Körper (2) die Erwärmung der Körper (3) die Erhöhung der Temperatur (4) die Verringerung der Temperatur (5) das thermische Verhalten der Körper	die schnellere Bewegung der Moleküle die Verringerung der kinetischen Energie der Teilchen die Bewegung der Moleküle die Vergrößerung der kinetischen Energie der Teilchen die langsamere Bewegung der Moleküle

2.3. Temperatur und Temperaturskalen

zusammengesetzte Substantive

Ergänzen Sie den Text!

Den thermischen Zustand eines Körpers nennt man auch . . . . Mit der Temperatur beschreibt man diesen Zustand. Deshalb ist die Temperatur eine . . . . Für die Temperatur verwendet man zwei Skalen: die . . . . und die . . . . Bei diesen Skalen unterscheidet man drei Festpunkte: Dem . . . . ordnet man 273,15 K oder 0 °C zu, dem . . . . 373,15 K oder 100 °C und dem . . . . 0 K oder −273,15 °C.	Zustandsgröße Dampfpunkt *Kelvin*-Temperaturskale Wärmezustand Eispunkt *Celsius*-Temperaturskale absoluter Nullpunkt

2.4. Temperatur und Wärmezustand

Angabe eines Zweckes oder eines Mittels

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!
Beachten Sie dabei das Fragewort!

(1) Wozu braucht man den Begriff ‚Temperatur'? (2) Wodurch kann man den Begriff ‚Temperatur' erläutern? (3) Wie kann man die Temperatur eines Körpers erhöhen? (4) Wozu braucht man Temperaturskalen? (5) Wie erhält man Temperaturskalen? (6) Wozu verwendet man Thermometer?	Angabe von Temperaturen erwärmen Bewegung der Teilchen Untersuchung des Wärmezustandes Abstand der Festpunkte in gleiche Teile teilen Temperaturmessung

2.5. Temperatur und Teilchenbewegung

2.5.1. Zwischen der Temperatur und der Bewegung der Teilchen besteht ein Zusammenhang.
Sprechen Sie über diesen Zusammenhang und beachten Sie dabei die folgenden Möglichkeiten!

► Wenn man einen Körper erwärmt oder abkühlt, so ändert sich der Wärmezustand des Körpers.
► Bei Erwärmung oder Abkühlung ändert sich der Wärmezustand.

(1) Erwärmung, Abkühlung	–	Änderung des Wärmezustandes
(2) Änderung des Wärmezustandes	–	Steigen, Fallen der Temperatur
(3) Änderung der Temperatur	–	Änderung der Bewegung der Moleküle
(4) Bewegung der Moleküle	–	kinetische Energie der Teilchen
(5) Vergrößerung, Verringerung der kinetischen Energie der Teilchen	–	Steigen, Fallen der Temperatur

2.5.2. *Bilden und beantworten Sie Fragen!*

Angabe einer Bedingung

► Unter welcher Bedingung steigt die Temperatur?
► Wenn man einen Körper erwärmt, so steigt die Temperatur.
► Bei Erwärmung.

(1) Steigen der Temperatur,
(2) Fallen der Temperatur,
(3) Änderung des Wärmezustandes,
(4) Vergrößerung der kinetischen Energie der Teilchen,

(5) Verringerung der kinetischen Energie der Teilchen,
(6) Änderung der Bewegung der Moleküle

2.6. Die absolute Temperatur

2.6.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Was geschieht, wenn man einen Körper abkühlt?
(2) Wie nennt man die tiefste Temperatur, die theoretisch möglich ist?
(3) Welche Einheit hat die absolute Temperatur?
(4) In welcher Einheit mißt man Temperaturdifferenzen?
(5) Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Einheiten Kelvin (K) und Grad Celsius (°C)?
(6) Welche Temperaturen sind die Festpunkte der *Kelvin*-Temperaturskale?

2.6.2. *Notieren Sie* für einen Kurzvortrag die Antworten zu den 6 Fragen, und *sprechen Sie* zum Thema „Die absolute Temperatur“!

2.6.3. *Erläutern Sie* den Zusammenhang zwischen den Einheiten Kelvin (K) und Grad Celsius (°C) durch (1) Zahlenbeispiele, (2) das Nomogramm in Abb. 1.2., (3) das Diagramm in Abb. 1.2.

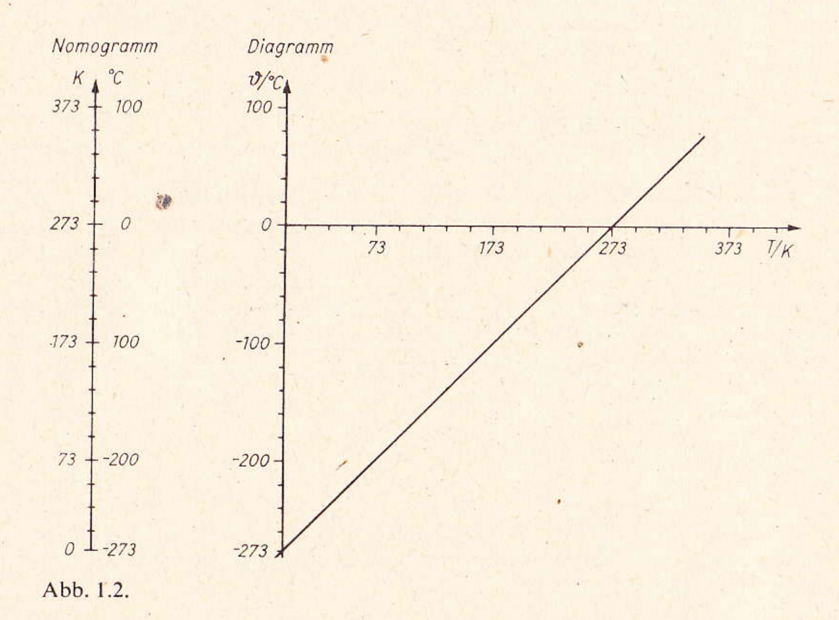


Abb. 1.2.

2.7. Ein Vergleich von Erwärmung und Abkühlung

2.7.1. *Vergleichen Sie* die Erwärmung und die Abkühlung der Körper in bezug auf die Temperatur!

	das Gemeinsame	die Unterschiede
Erwärmung	die Temperatur ändert sich	die Temperatur steigt
Abkühlung		die Temperatur fällt

2.7.2. *Vergleichen Sie* Erwärmung und Abkühlung in bezug auf die kinetische Energie der Teilchen!

2.7.3. *Vergleichen Sie* Erwärmung und Abkühlung in bezug auf den Energieinhalt der Körper!

3. Übungen zum Thema

3.1. Die Temperaturmessung

3.1.1. *Beschreiben Sie* ein Flüssigkeitsthermometer!

3.1.2. *Informieren Sie* sich in einem Lehrbuch für Physik über die Möglichkeiten der Temperaturmessung, und *nennen Sie* die wichtigsten!

3.2. Die Bedeutung der Temperaturmessung in der Technik
Nennen Sie einige technische Prozesse, bei denen die Temperaturmessung von großer Bedeutung ist!

4. Textaufgaben

1. Wieviel K sind 19 °C? (186 °C; −15 °C; −201 °C)
2. Wieviel °C sind 388 K? (2002 K; 17 K; 373 K; 2 K)

2. Die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Körper

2.1. Die lineare Ausdehnung fester Körper

Wenn ein fester Körper erwärmt oder abgekühlt wird, so ändert sich seine Länge. Im allgemeinen dehnt er sich bei Erwärmung aus, bei Abkühlung zieht er sich zusammen. Durch Versuche kann die Längenänderung Δl festgestellt werden, die bei einer bestimmten Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ entsteht. So findet man, daß die Längenänderung Δl bei gleichen Temperaturänderungen der Anfangslänge l_0 bei 0 °C proportional ist. Bei gleichen Anfangslängen ist die Längenänderung Δl der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ proportional.
Diese Ergebnisse kann man in einer Gleichung zusammenfassen:

(1)	Längenänderung	$\Delta l = \alpha\, l_0 \Delta\vartheta$

Der Proportionalitätsfaktor α wird linearer Ausdehnungskoeffizient genannt. Er ist eine Materialkonstante. Im allgemeinen ist der Wert dieses Koeffizienten auch von der Temperatur abhängig. In den Tabellen gibt man meistens einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten an, der für Temperaturen zwischen 0 °C und 100 °C gilt.

Tabelle 2.1. Lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten einiger Stoffe zwischen 0 °C und 100 °C

Stoff	α in 1/K
Aluminium	0,000023
Kupfer	0,000016
Stahl	0,000013

Wenn man die Gesamtlänge l bei einer bestimmten Temperatur berechnen will, muß man die Längenänderung Δl zur Anfangslänge l_0 addieren.
Man erhält die folgende Gleichung.

(2)	Gesamtlänge	$l = l_0(1 + \alpha\Delta\vartheta)$

Diese Gleichung gilt für eine Anfangstemperatur von 0 °C. Wenn die Anfangstemperatur aber nicht gleich 0 °C ist, erhält man bei Benutzung der Gleichungen (1) und (2) Ergebnisse, die von den richtigen Werten etwas abweichen. Die Abweichungen sind aber so klein, daß man sie vernachlässigen kann. Man benutzt deshalb in der Praxis folgende Näherungsgleichung:

(3)	Näherungsgleichung für die Gesamtlänge	$l_2 = l_1(1 + \alpha\Delta\vartheta)$

Diese Gleichung verwendet man für eine beliebige Anfangstemperatur ϑ_1 und für eine beliebige Endtemperatur ϑ_2. $\Delta\vartheta$ ist die Temperaturdifferenz $\vartheta_2 - \vartheta_1$. Da bei einer Abkühlung ϑ_2 kleiner als ϑ_1 ist, erhält man in diesem Fall eine negative Temperaturdifferenz.

2.2. Die Volumenausdehnung fester und flüssiger Körper

2.2.1. Die Volumenausdehnung von festen Körpern

Bei einer Temperaturänderung ändert sich nicht nur die Länge, sondern auch das Volumen der festen Körper. Man spricht von einer kubischen Ausdehnung. Entsprechend der Gleichung (3) erhält man für das Gesamtvolumen V_2 folgende Näherungsgleichung:

(4)	Näherungsgleichung für das Gesamtvolumen	$V_2 = V_1(1 + \gamma\Delta\vartheta)$

Auch diese Gleichung verwendet man für eine beliebige Anfangstemperatur ϑ_1 und eine beliebige Endtemperatur ϑ_2.
Die Materialkonstante γ heißt kubischer Ausdehnungskoeffizient. Für feste Körper gilt die Beziehung $\gamma \approx 3\alpha$.
Die Kräfte, die bei der Wärmeausdehnung entstehen, sind sehr groß. Das muß in der Technik beachtet werden. Die Ausdehnung der festen Körper durch die Änderung der Temperatur darf nicht zur Zerstörung von Maschinen und Gebäuden führen. Deshalb lagert man z. B. eine Seite einer Brücke auf Rollen und baut in Rohrleitungen Dehnungsausgleicher ein.
Bei Bimetallstreifen sind zwei Stoffe mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten fest verbunden, so daß sich die Streifen bei einer Temperaturänderung verbiegen. Diese Bimetallstreifen werden in vielen Geräten benutzt (vgl. Abb. 2.1.).

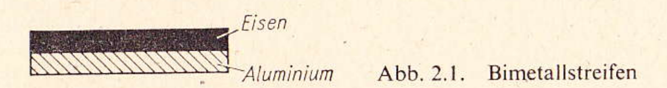


Abb. 2.1. Bimetallstreifen

2.2.2. Die Volumenausdehnung von Flüssigkeiten

Für Flüssigkeiten gibt es keine lineare, sondern nur eine kubische Ausdehnung, für die die Gleichung (4) gilt. Den kubischen Ausdehnungskoeffizienten γ für Flüssigkeiten findet man in Tabellen. Flüssigkeiten dehnen sich bei gleichen Bedingungen stärker aus als feste Körper.
Wenn man die Ausdehnung einer Flüssigkeit berechnen will, muß man beachten, daß sich das Gefäß auch ausdehnt. Dabei ändert sich das Volumen von Hohlkörpern wie das Volumen von Vollkörpern aus dem gleichen Material.

2.2.3. Die Anomalie des Wassers

Für Wasser gibt es eine Besonderheit, die man als Anomalie des Wassers bezeichnet. Wenn man Wasser von 0 °C bis 4 °C erwärmt, dehnt es sich nicht aus, sondern zieht sich zusammen. Erst nach weiterer Erwärmung dehnt es sich aus. Umgekehrt vergrößert sich das Volumen des Wassers, wenn man es unter 4 °C abkühlt (vgl. Abb. 2.2.).

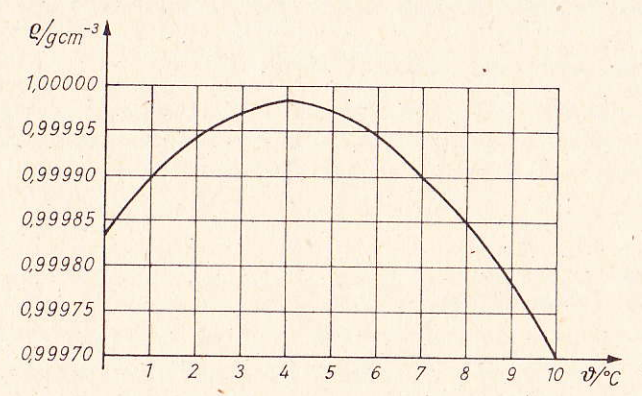


Abb. 2.2. Dichte des Wassers

Unter der Dichte ϱ eines Körpers versteht man den Quotienten aus seiner Masse m und seinem Volumen V.

(5)	Dichte	$\varrho = \frac{m}{V}$	$[\varrho] = 1\,g/cm^3$

Wegen seiner Anomalie hat Wasser bei 4 °C seine größte Dichte. Deshalb bleibt das Wasser in den unteren Teilen von Flüssen und Seen auch bei Außentemperaturen unter 0 °C flüssig.

Lehrbeispiel:

Wie groß ist die Dichte von Stahl bei 20 °C, wenn sie bei 1200 °C 7,3 g/cm³ beträgt? Der lineare Ausdehnungskoeffizient von Stahl beträgt $11 \cdot 10^{-6}\,K^{-1}$ (vgl. Lösungsschema S. 441).

S_1 gegeben:

$\vartheta_1 = 1200\,°C$ $\qquad \varrho_1 = 7{,}3\,g/cm^3$

$\vartheta_2 = 20\,°C$ $\qquad \alpha = 11 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

gesucht:

ϱ_2

S_2

$\varrho_1 = m_1/V_1 \qquad V_2 = V_1(1 + \gamma\Delta\vartheta)$

$\varrho_2 = m_2/V_2 \qquad \gamma = 3\alpha$

$m_1 = m_2 \qquad \Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$

S_3

$$m_1 = m_2 \qquad \varrho_2 = \frac{7{,}3\,\frac{g}{cm^3}}{1 + 33 \cdot 10^{-6} K^{-1}(20 - 1200)\,K}$$

$$\varrho_1 V_1 = \varrho_2 V_2 \qquad = \frac{7{,}3\,\frac{g}{cm^3}}{1 - 33 \cdot 1180 \cdot 10^{-6}}$$

$$\varrho_2 = \varrho_1 \frac{V_1}{V_2}$$

$$= \varrho_1 \frac{V_1}{V_1(1 + \gamma\Delta\vartheta)} \qquad = \frac{7{,}3}{1 - 0{,}0389}\,\frac{g}{cm^3} = \frac{7{,}3}{0{,}96(11)}\,\frac{g}{cm^3}$$

$$\varrho_2 = \frac{\varrho_1}{1 + 3\alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)} \qquad \varrho_2 = 7{,}6\,\frac{g}{cm^3}$$

allgemeine Lösung — spezielle Lösung

Die Dichte von Stahl beträgt bei 20 °C 7,6 g/cm³.

S_4 Die Frage des Textes ist beantwortet. Das Ergebnis ist physikalisch sinnvoll, da die Verringerung des Volumens bei konstanter Masse zur Vergrößerung der Dichte führen muß.

Wortliste zum Text

ab/weichen von D
  wich ab, abgewichen (sein)
addieren A
  etwas zu D addieren
das Aluminium, o.
die Anomalie, -n
aus/dehnen, (sich) A
die Ausdehnung, -en
aus/gleichen A
  glich aus, ausgeglichen
außen
beliebig
berechnen A
bestehen aus D
  bestand, bestanden
bezeichnen A (als A)
der Bimetallstreifen, -
dar/stellen A

die Dehnung, -en
der Dehnungsausgleicher, -
die Dichte, -n
  entsprechend D
  folgen (aus D) (sein)
die Freileitung, -en
das Gefäß, -e
  gelten
    galt, gegolten
  gesamt
die Gleichung, -en
  hohl
  interpretieren A
der Koeffizient, -en
  des Koeffizienten
die Konstante, -n
die Kraft, ⸚e
  kubisch

das Kupfer, o.
lagern A
linear
die Masse, -n
das Material, -ien
mittlere
der mittlere Wert = der Mittelwert
die Näherung, -en
negativ
proportional (zu) D
der Proportionalitätsfaktor, -en
der Quotient, -en
des Quotienten
das Rohr, -e
die Rohrleitung, -en
die Rolle, -n
der Stahl
stark
der Stoff, -e (Material)
der Streifen, -
der Term, -e
um/kehren A
verbiegen, (sich) A
verbog, verbogen
vernachlässigen A
voll
das Volumen, -
zusammen/ziehen, (sich) A
zog zusammen, zusammengezogen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was folgt aus der Temperaturänderung für die Länge eines festen Körpers?
2) Wovon hängt der Betrag der Längenänderung ab?
3) Was für eine Größe ist der lineare Ausdehnungskoeffizient, und welche Einheit hat er?
4) Was bedeuten die Terme in der Gleichung $l = l_0(1 + \alpha\Delta\vartheta)$?
5) Warum ist die Gleichung $l_2 = l_1(1 + \alpha\Delta\vartheta)$ eine Näherungsgleichung?
6) Unter welcher Voraussetzung ist $\Delta\vartheta$ negativ?
7) Was ist kubische Ausdehnung?
8) Warum muß man in der Technik die Wärmeausdehnung beachten?
9) Was muß man bei der Untersuchung der Ausdehnung von Flüssigkeiten beachten?
10) Was versteht man unter der Anomalie des Wassers?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Wärmeausdehnung der Körper

sich aus/dehnen   sich zusammen/ziehen

Unter bestimmten Bedingungen dehnt sich ein Körper aus bzw. zieht sich zusammen. Wenn sich die Temperatur eines Körpers ändert, so ändert sich im allgemeinen auch sein Volumen.

Beantworten Sie die folgenden Fragen! Verwenden Sie dabei „sich ausdehnen“ und „sich zusammenziehen“!

(1) Was geschieht, wenn die Temperatur eines Rohres steigt?
(2) Was geschieht, wenn man einen Körper abkühlt?
(3) Unter welcher Bedingung dehnt sich ein Körper aus?
(4) Was geschieht, wenn die Temperatur eines Rohres fällt?
(5) Was geschieht, wenn man einen Körper erwärmt?
(6) Unter welcher Bedingung zieht sich ein Körper zusammen?

2.2. Temperaturänderung und Längenänderung

zusammengesetzte Substantive

Ergänzen Sie den Text!

Ein Rohr aus Metall ändert seine Länge, wenn man die Temperatur des .... ändert.
Was ist die Ursache für die Änderung der Temperatur? Die Ursache der .... ist die Abkühlung oder Erwärmung.
Die Änderung der Länge nennt man ....
Die Temperatur am Anfang des Versuchs beträgt 20 °C. Die .... ist kleiner als die Endtemperatur.
Die Länge bei 100 °C ist größer als die ....
Den Koeffizienten für die Ausdehnung kann man experimentell bestimmen. Wichtig sind die Tabellen mit den .... für den Techniker.

die Anfangslänge
das Metallrohr
der Ausdehnungskoeffizient
die Anfangstemperatur
die Längenänderung
die Temperaturänderung

2.3. Die mathematische Beschreibung der Wärmeausdehnung

Die Gleichungen zur Beschreibung der Wärmeausdehnung sollen interpretiert werden. Die **Interpretation** einer Gleichung bedeutet die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Welche physikalischen Größen treten in der Gleichung auf?
Welcher Zusammenhang besteht zwischen den einzelnen physikalischen Größen?
Unter welcher Bedingung gilt die Gleichung?

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $\Delta l = \alpha l_0 \Delta\vartheta$

(2) $l_1 = l_0(1 + \alpha\Delta\vartheta)$

(3) $l_2 = l_1(1 + \alpha\Delta\vartheta)$

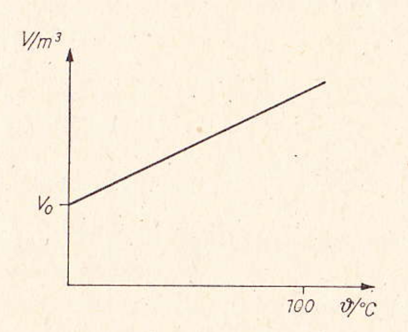
(4) $V_2 = V_1(1 + \gamma\Delta\vartheta)$

2.4. Die Ausdehnung der flüssigen Körper

2.4.1. *Vergleichen Sie* die festen und flüssigen Körper in bezug auf die Wärmeausdehnung! (vgl. S. 29)

2.4.2. *Vergleichen Sie* die Diagramme (vgl. Abb. 2.3.) in bezug auf

(1) den dargestellten physikalischen Sachverhalt und
(2) die Gültigkeit der allgemeinen Ausdehnungsgesetze!



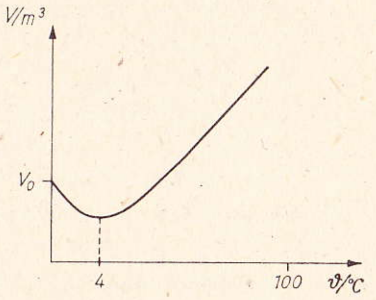


Abb. 2.3.

2.5. Der Bimetallstreifen

2.5.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Woraus besteht ein Bimetallstreifen?
(2) Was geschieht, wenn man einen Bimetallstreifen erwärmt?
(3) Warum verbiegt sich ein Bimetallstreifen bei Erwärmung?
(4) Was geschieht, wenn sich der Bimetallstreifen wieder abkühlt?

2.5.2. *Sprechen Sie* zum Thema „Der Bimetallstreifen“!

3. Übungen zum Thema

3.1. Ein Versuch zur linearen Ausdehnung

Drei Metallrohre (Al, Cu, Fe) gleicher Anfangslänge werden mit Hilfe von Wasserdampf erwärmt. Danach wird die Längenänderung gemessen.

3.1.1. Die Beschreibung der Versuchsdurchführung

Angabe eines Zweckes oder Mittels

Beantworten Sie die Fragen!

(1) Wozu erwärmt man das Wasser?
(2) Womit erwärmt man die Metallrohre?
(3) Wie bestimmt man die Anfangstemperatur der Metallrohre?
(4) Wie bestimmt man die Endtemperatur?
(5) Womit bestimmt man die Anfangslänge?
(6) Womit mißt man die Temperatur des Wasserdampfes?
(7) Wie bestimmt man die Längenänderung?

mit
indem
damit

Differenz aus Anfangslänge und Länge nach der Erwärmung bilden
Wasserdampf erhalten
Temperatur des Wassers bestimmen
Zimmertemperatur messen
Wasserdampf
Lineal
Flüssigkeitsthermometer

3.1.2. Die Schlußfolgerung aus dem Versuch

Vergleichen Sie die drei Metallrohre
(1) in bezug auf die Anfangslänge und das Material
(2) in bezug auf die Temperaturänderung und die Längenänderung!

Was folgt aus dem Vergleich?

3.2. Lineare Ausdehnungskoeffizienten

Üben Sie zu zweit!
Informieren Sie sich bei einem Freund über die linearen Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Stoffe, indem Sie fragen:

► „Welchen linearen Ausdehnungskoeffizienten hat ...?“

Ihr Freund beantwortet die Frage mit Hilfe einer Tabelle!

3.3. Anwendungen des Bimetallstreifens

Sprechen Sie über den Aufbau, die Wirkungsweise und die Anwendung des Bimetallstreifens!

3.4. Die Beachtung der Ausdehnungsgesetze in der Technik

Sprechen Sie über die Beachtung der Ausdehnungsgesetze bei elektrischen Freileitungen und beim Bau von Brücken!

3.5. Die Verwendung von Stahlbeton

Üben Sie zu zweit!
Informieren Sie sich bei einem Freund über die Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und Beton und über die Verwendung von Stahlbeton!

4. Textaufgaben

3. Eine Brücke aus Stahl ist 83,5 m lang. Wie groß ist die Längendifferenz bei einer maximalen Temperaturdifferenz von 80 K?

4. Eine Rohrleitung aus Stahl hat bei 10 °C eine Länge von 200 m. Wie groß ist die Verlängerung, wenn Dampf mit einer Temperatur von 110 °C durch die Leitung strömt und die Leitung die Temperatur des Dampfes angenommen hat? ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$)

5. Eine Rohrleitung aus Kupfer ist bei 80 °C 1200 m lang. Wie lang ist sie bei −10 °C?

6. Ein Stab aus Eisen und ein Stab aus Aluminium haben bei 0 °C die gleiche Länge $l_0 = 100$ cm. Wie groß ist die Differenz ihrer Längen bei 80 °C? ($\alpha_{Fe} = 12 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$)

7. Eine Eisenkugel hat bei 0 °C einen Durchmesser von 5,6 cm. Wie groß ist ihr Volumen bei 425 °C? ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$)

8. Ein Aluminiumzylinder hat bei 0 °C einen Durchmesser von 60 mm und eine Höhe von 80 mm. Wie groß sind Durchmesser, Höhe und Volumen des Zylinders, wenn die Temperatur auf 80 °C steigt? ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$)

9. Ein Glas ist bei 18 °C mit 600 cm³ Wasser gefüllt. Wieviel Wasser läuft aus dem Glas, wenn man Glas und Wasser auf 95 °C erwärmt? Beachten Sie auch die Ausdehnung des Glases!
Leiten Sie eine allgemeine Gleichung für die Ausdehnung einer Flüssigkeit in einem Gefäß her!

10. Ein Thermometer enthält bei 18 °C 1 cm³ Quecksilber. Bei einer Erwärmung um 1 K steigt das Quecksilber im Glasrohr um 5 mm. Wie groß ist der Durchmesser des Glasrohres? Beachten Sie die Ausdehnung des Glases!

11. Aluminium hat bei 18 °C die Dichte $\varrho_{18} = 2{,}7\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$. Berechnen Sie die Dichte von Aluminium bei −50 °C!

3. Die Zustandsänderungen des idealen Gases

3.1. Die allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gas

Die Gleichung für die Volumenausdehnung der festen und flüssigen Körper kann nicht für Gase verwendet werden.
Das Volumen eines Gases hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Druck ab. Der Druck ist eine physikalische Größe, die man mit p bezeichnet. Der Druck ist durch folgende Gleichung definiert:

Druck	$p = \frac{F}{A}$	$[p] = 1\ \mathrm{N/m^2} = 1\ \mathrm{Pa}$ (Pascal)

In dieser Definitionsgleichung ist F die Kraft, die senkrecht auf die Fläche A wirkt. N ist das Symbol für die Krafteinheit Newton.
Volumen, Temperatur und Druck beschreiben den Zustand eines Gases. Man nennt sie deshalb Zustandsgrößen. Die Beziehungen zwischen diesen Größen werden durch die allgemeine Zustandsgleichung der Gase dargestellt.
Wir betrachten eine abgeschlossene Gasmenge, deren Masse also konstant ist. Wenn durch p_1, V_1 und T_1 bzw. p_2, V_2 und T_2 zwei beliebige Zustände dieser abgeschlossenen Gasmenge beschrieben werden, so gilt die folgende Gleichung:

(1)	Allgem. Zustandsgleichung für das ideale Gas	$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ oder $\frac{pV}{T} = \text{konst.}$

► Für eine abgeschlossene Gasmenge ist der Term $\frac{pV}{T}$ für alle Zustände konstant.

Die Gleichung (1) gilt nur für ein Modellgas exakt. Dieses Modellgas nennt man das ideale Gas. Das ideale Gas erfüllt zwei Bedingungen. Erstens sind seine Moleküle punktförmig und zweitens wirken zwischen den Molekülen keine Kräfte. Ein solches Gas gibt es in der Realität nicht, aber unter bestimmten Bedingungen verhalten sich reale Gase wie das ideale Gas (vgl. 4.3.). Das Modell ‚ideales Gas' hilft, die objektive Realität zu erkennen und quantitativ zu beschreiben.

3.2. Die isotherme Zustandsänderung (T = konst.)

Eine Zustandsänderung heißt isotherm, wenn die Temperatur konstant bleibt. Das Gesetz für diese spezielle Zustandsänderung kann man aus der allgemeinen Zu-

standsgleichung herleiten. Da jetzt $T_1 = T_2$ gilt, erhält man folgende spezielle Gleichung:

(2)	Zustandsgleichung für isotherme Zustandsänderungen	$p_1 V_1 = p_2 V_2$ oder $pV =$ konstant

Die Gleichung (2) nennt man auch Gesetz von *Boyle*.

► Bei konstanter Temperatur ist das Produkt aus dem Druck und dem Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge konstant.

Aus $pV =$ konstant folgt, daß der Druck indirekt proportional zum Volumen ist. Im p-V-Diagramm erhält man zu jeder bestimmten Temperatur T Kurven, die man Isothermen nennt. Auf einer Isothermen ist die Temperatur überall gleich (vgl. Abb. 3.1.).

3.3. Die isochore Zustandsänderung (V = konst.)

Bei dieser Zustandsänderung bleibt das Volumen der abgeschlossenen Gasmenge konstant. Wegen $V_1 = V_2$ erhält man aus der allgemeinen Zustandsgleichung das folgende Gesetz:

(3)	Zustandsgleichung für isochore Zustandsänderungen	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ oder $\frac{p}{T} =$ konst.

► Bei konstantem Volumen ist der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge der absoluten Temperatur direkt proportional.

Isochoren sind Linien, auf denen das Volumen überall konstant ist. Im p-V-Diagramm sind die Isochoren parallel zur p-Achse (vgl. Abb. 3.2.).

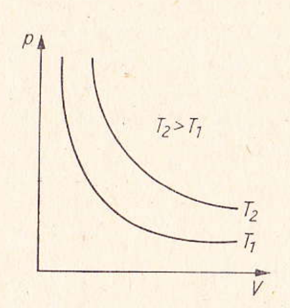


Abb. 3.1. Isothermen des idealen Gases

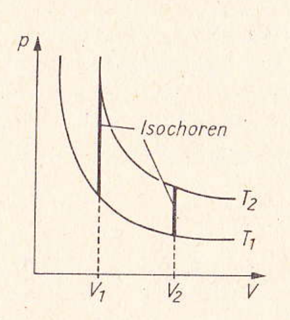


Abb. 3.2. Isochoren des idealen Gases

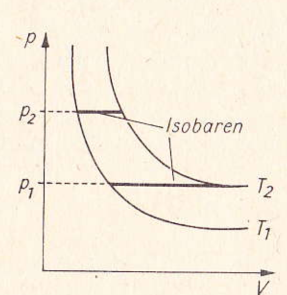


Abb. 3.3. Isobaren des idealen Gases

3.4. Die isobare Zustandsänderung (p = konst.)

Eine dritte spezielle Zustandsänderung der Gase erhält man, wenn der Druck konstant bleibt. Wegen der Konstanz des Druckes folgt aus der allgemeinen Zustandsgleichung in diesem Fall das folgende Gesetz:

(4)	Zustandsgleichung für isobare Zustandsänderungen	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ oder $\frac{V}{T} =$ konst.

► Bei konstantem Druck ist das Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge der absoluten Temperatur direkt proportional.

Isobaren sind Linien gleichen Drucks. Im p-V-Diagramm sind sie parallel zur V-Achse. Das Diagramm zeigt, daß ein Steigen der Temperatur mit einer Vergrößerung des Volumens verbunden ist und umgekehrt (vgl. Abb. 3.3.).

■ **Lehrbeispiel:**

Um wieviel Prozent nimmt das Volumen eines Gases zu, wenn die Celsiustemperatur bei konstantem Druck von 117,1 °C auf 234,2 °C steigt?

S_1 gegeben:

$\vartheta_1 = 117{,}1$ °C

$\vartheta_2 = 234{,}2$ °C

$p =$ konst.

gesucht:

$\frac{V_2}{V_1}$ in Prozent

S_2 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$; $T/\mathrm{K} = \vartheta/°\mathrm{C} + 273$

S_3 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{(\vartheta_2/°\mathrm{C} + 273)\,\mathrm{K}}{(\vartheta_1/°\mathrm{C} + 273)\,\mathrm{K}}$ allgemeine Lösung

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{507{,}2\ \mathrm{K}}{390{,}1\ \mathrm{K}} = 1{,}3 = 130\,\%$ spezielle Lösung

Das Volumen steigt um 30%.

3.5. Zusammenfassung

Die Gesetze der Abschnitte 3.2. bis 3.4. wurden deduktiv aus der allgemeinen Zustandsgleichung für das ideale Gas hergeleitet. Sie gelten nur, wenn die allgemeine Zustandsgleichung gilt, d. h. sie gelten exakt für eine abgeschlossene Menge eines idealen Gases. Für reale Gase erhalten wir mit diesen Gleichungen Näherungswerte, die für viele Aufgaben der Praxis ausreichen. Die Gleichungen der Abschnitte 3.3. und 3.4. gelten nur für absolute Temperaturen. Wenn man *Celsius*temperaturen benutzt, erhält man die entsprechenden Gesetze von *Gay-Lussac*:

Druckgesetz von *Gay-Lussac*	$p_1 = p_0(1 + \gamma \Delta \vartheta)$	für V = konst.
Volumengesetz von *Gay-Lussac*	$V_1 = V_0(1 + \gamma \Delta \vartheta)$	für p = konst.

Diese Gesetze gelten nur für die Anfangstemperatur $\vartheta_0 = 0$ °C. Die Konstante γ hat für das ideale Gas den Wert $\frac{1}{273{,}15}$ K^{-1}.

Wortliste zum Text

ab/schließen A
schloß ab, abgeschlossen
beziehungsweise (Abk bzw.)
deduktiv
definieren A
das Diagramm, -e
doppelt
der Druck, ⸚e
erfüllen A
erkennen A
erkannte, erkannt
exakt
das Gas, -e
her/leiten A (aus D)
ideal
indirekt
isobar
die Isobare, -n
isochor
die Isochore, -n
isotherm
die Isotherme, -n
konstant
die Konstanz, o.
die Menge, -n
das Modell, -e
objektiv
punktförmig
quantitativ
real
die Realität
senkrecht
speziell
das Symbol, -e
verhalten, sich wie N
verhielt, verhalten
wirken auf A
die Zustandsgröße, -n

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum kann man die Gesetze der Volumenausdehnung für feste und flüssige Körper nicht für Gase anwenden?
2) Was bedeuten die Größen in der allgemeinen Zustandsgleichung für das ideale Gas?
3) Was vernachlässigt man beim Modell ‚ideales Gas'?
4) Wozu braucht man das Modell ‚ideales Gas'?
5) Wie erhält man die Zustandsgleichung für isotherme Zustandsänderungen aus der allgemeinen Zustandsgleichung?
6) Wie kann man bei einer isothermen Zustandsänderung den Druck erhöhen?
7) Warum sind Isochoren im p-V-Diagramm parallel zur p-Achse?
8) Was ist eine Isobare?
9) Wie kann man bei steigender Temperatur den Druck eines Gases konstant erhalten?
10) Für welches Gas gelten die im Text genannten Gesetze?

2. Übungen zum Text

2.1. Zustandsänderungen

zusammengesetzte Substantive

Ergänzen Sie den Text!

Den Zustand vor einer Zustandsänderung nennt man .... Den Zustand eines Gases beschreibt man mit .... Zustandsänderungen beschreibt man mit Gleichungen, den .... Die Änderungen des Druckes nennt man .... Den Zustand nach einer Zustandsänderung nennt man ....

Zustandsgleichung
Endzustand
Druckänderung
Anfangszustand
Zustandsgröße

2.2. Die allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gas

Angabe eines Zweckes oder eines Mittels

Beantworten Sie die Fragen in der richtigen grammatischen Form!

(1) Wodurch wird der Zustand eines Gases bestimmt?
(2) Wodurch wird eine abgeschlossene Gasmenge charakterisiert?

(3) Wozu braucht man Zustandsgrößen?
(4) Wozu verwendet man die allgemeine Zustandsgleichung?
(5) Wodurch wird das ideale Gas charakterisiert?
(6) Wozu benutzt man das ideale Gas?

2.3. Spezielle Zustandsänderungen

Angabe einer Bedingung oder eines Mittels

2.3.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

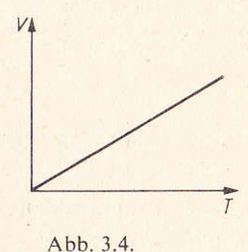
(1) Unter welcher Bedingung ist eine Zustandsänderung isotherm?
(2) Wie kann man bei konstanter Temperatur das Volumen verringern?
(3) Unter welcher Bedingung ist eine Zustandsänderung isobar?
(4) Wie erhält man aus der allgemeinen Zustandsgleichung das Volumengesetz von *Gay-Lussac*?
(5) Unter welcher Bedingung ist eine Zustandsänderung isochor?
(6) Wie kann man bei konstantem Volumen den Druck verringern?

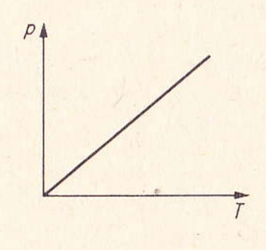
2.3.2. Diagramme für die Zustandsänderungen

direkt proportional   indirekt proportional

Bilden Sie bei Beachtung von Abb. 3.4. Sätze!

- Bei konstantem Druck ist das Volumen eines Gases der absoluten Temperatur direkt proportional.
- Volumen und absolute Temperatur sind bei konstantem Druck einander direkt proportional.





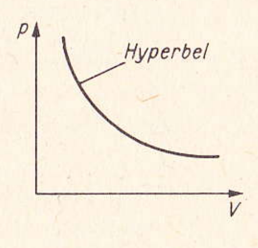


Abb. 3.4.

2.4. Die mathematische Beschreibung der Zustandsänderungen

2.4.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

den Zusammenhang beschreiben zwischen D

- Die allgemeine Zustandsgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen den drei Zustandsgrößen Druck, Volumen und Temperatur.

Welchen Zusammenhang beschreibt
(1) die allgemeine Zustandsgleichung?
(2) die isotherme Zustandsgleichung?

(3) die isobare Zustandsgleichung?
(4) das Gesetz von *Boyle*?
(5) das Volumengesetz von *Gay-Lussac*?
(6) das Druckgesetz von *Gay-Lussac*?
(7) die isochore Zustandsgleichung?

2.4.2. *Interpretieren Sie* (vgl. S. 29) die folgenden Gleichungen!

(1) $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ (3) $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

(2) $p_1 V_1 = p_2 V_2$ (4) $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

2.4.3. *Vergleichen Sie* die folgenden Gleichungen in bezug auf
(1) den dargestellten physikalischen Sachverhalt
(2) die verwendeten physikalischen Größen!

$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ für p = konst.   und $V_2 = V_1(1 + \gamma \Delta\vartheta)$ für p = konst.

2.5. Das Modell ‚ideales Gas'

2.5.1. *Begründen Sie* die Verwendung des Modells ‚ideales Gas', indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Welche Aussage kann man über das Volumen der Moleküle eines beliebigen Gases machen?
(2) Was wissen Sie über die Kräfte zwischen den Molekülen eines beliebigen Gases?
(3) Was vernachlässigt man beim Modell ‚ideales Gas'?
(4) Welche realen Gase verhalten sich wie das Modell?
(5) Warum kann man mit dem Modell die objektive Realität besser beschreiben?

2.5.2. *Notieren Sie* die Antworten zu den 5 Fragen unter 2.5.1., und *sprechen Sie* zum Thema „Das Modell des idealen Gases"!

2.6. Das Allgemeine und das Besondere

Bilden und beantworten Sie Fragen!
Verwenden Sie das Schema!

- Wozu benutzt man die allgemeine Zustandsgleichung?
- Unter welcher Bedingung wird aus der allgemeinen Zustandsgleichung das Gesetz von *Boyle*?

► Wie erhält man aus der allgemeinen Zustandsgleichung das Gesetz von *Boyle*?

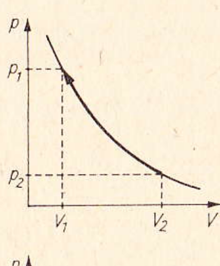
	Bedingung	
$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$	T = konst.	$p_1 V_1 = p_2 V_2$
	V = konst.	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
	p = konst.	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

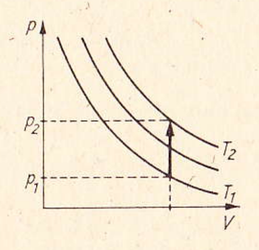
3. Übungen zum Thema

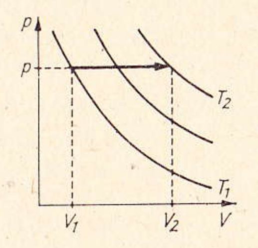
3.1. Die Darstellung der Zustandsänderungen in Diagrammen

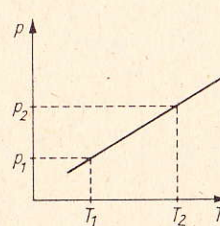
Sprechen Sie zu den Diagrammen der Abb. 3.5., indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Welcher Zusammenhang wird in dem Diagramm dargestellt?
(2) Wie nennt man die entsprechende Zustandsänderung?
(3) Welche mathematische Darstellung gehört zum Diagramm?









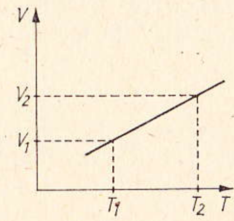


Abb. 3.5.

3.2. Die isotherme Zustandsänderung

Beschreiben Sie einen Versuch zum *Boyle*schen Gesetz (Ziel des Experiments, Geräte, Messung, Ergebnis)!

3.3. Beschreibung eines p-V-Diagramms

Im p-V-Diagramm der Abb. 3.6. sind 4 Zustandsänderungen dargestellt.

Beantworten Sie die folgenden Fragen!

(1) Was für eine Zustandsänderung bedeutet A – B?
(2) Was versteht man unter dieser Zustandsänderung?
(3) Wie ändern sich bei dieser Zustandsänderung Druck, Volumen und Temperatur?
(4) Wie kann man diese Änderung mathematisch beschreiben?

Beantworten Sie diese Fragen auch für die Änderungen B – C, C – D und D – A!

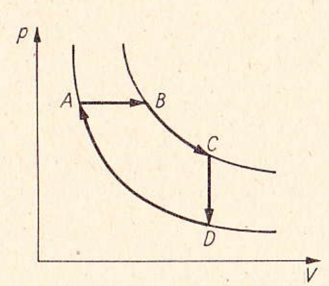


Abb. 3.6.

4. Textaufgaben

12. Eine Gasflasche für Sauerstoff mit einem Volumen von 40 l wird bei 0 °C unter einem Druck von $1{,}47 \cdot 10^7$ Pa gefüllt. Wieviel Liter kann man unter einem Druck von $1{,}47 \cdot 10^5$ Pa bei einer Temperatur von 20,5 °C entnehmen?
13. Eine 8-l-Flasche mit Kohlendioxid hat bei einer Temperatur von 20 °C einen Druck von $1{,}18 \cdot 10^6$ Pa. Wie groß ist das Volumen des Gases im Normzustand (bei 0 °C und bei $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa)?
14. Ein Ballon enthält auf der Erde bei 18 °C und einem Luftdruck von $1{,}002 \cdot 10^5$ Pa 1200 m³ Gas. In größerer Höhe bei einem Luftdruck von $4{,}73 \cdot 10^4$ Pa enthält der Ballon 2250 m³ Gas. Welche Temperatur hat dort das Gas?
15. Der Druck von 0,028 m³ Luft wird bei konstanter Temperatur von $9{,}35 \cdot 10^4$ Pa auf $4{,}91 \cdot 10^5$ Pa erhöht. Wie groß ist dann das Volumen?
16. Der Druck in einer Gasflasche beträgt bei einer Temperatur von −14 °C $5{,}89 \cdot 10^6$ Pa. Auf welche Temperatur ist das Gas erwärmt worden, wenn der Druck $7{,}36 \cdot 10^6$ Pa beträgt?
17. 3 m³ eines Gases mit einer Temperatur von 10 °C werden bei konstantem Druck auf 120 °C erwärmt. Wie groß ist das Volumen bei dieser Temperatur?

18. Bei welcher Temperatur verdoppelt sich der Druck eines Gases, wenn das Volumen konstant bleibt und die Anfangstemperatur 20 °C beträgt?

19. Wenn eine Gasmenge, die in einer Flasche eingeschlossen ist, um 150 K erwärmt wird, so steigt ihr Druck um 40%. Wie groß sind Anfangs- und Endtemperatur?

4. Ideale und reale Gase

4.1. Die Abhängigkeit des Terms $\frac{pV}{T}$

Für zwei oder mehr verschiedene Zustände einer abgeschlossenen Menge eines idealen Gases schreibt man die allgemeine Zustandsgleichung in der Form:

(1) $$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \ldots = \text{konstant}$$

Da die Konstante noch nicht bekannt ist, kann man die Gleichung in dieser Form nur verwenden, wenn mindestens zwei Zustände des Gases betrachtet werden.

Zur Bestimmung der Konstanten der Gleichung (1) untersucht man den Term $\frac{pV}{T}$ für verschiedene Mengen des gleichen (idealen) Gases. Man erhält das Ergebnis, daß der untersuchte Term der Masse m direkt proportional ist.

(2) $$\frac{pV}{T} \sim m \quad \text{für ein bestimmtes (ideales) Gas}$$

Um die Abhängigkeit des untersuchten Terms von der Art des Gases festzustellen, wählt man unterschiedliche Gase. Dabei soll die Masse der untersuchten Gase gleich sein.

Als Größe verwendet man die molare Masse der Stoffe. Für die molare Masse (m_{mol}) gilt folgende Definition:

molare Masse	$m_{mol} = \frac{m}{n} = \frac{\text{Masse}}{\text{Stoffmenge}}$

Dabei ist die Stoffmenge durch folgende Beziehung definiert:

Stoffmenge	$n = \frac{N}{N_L} = \frac{\text{Teilchenzahl eines Stoffes}}{\textit{Loschmidt}\text{sche Konstante}}$

Die Stoffmenge ist eine Grundgröße des SI (vgl. S. 435).

Die Einheit der Stoffmenge ist das Mol (mol). Da die *Loschmidt*sche Konstante den Wert $N_L = 6{,}023 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ hat, sind in einem Mol eines jeden Gases $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen enthalten.

Entsprechend ihrer Definitionsgleichung hat die molare Masse die Einheit $1\ \text{g mol}^{-1}$.

Die Untersuchung der verschiedenen Gase zeigt, daß der Term $\frac{pV}{T}$ der molaren Masse indirekt proportional ist:

(3) $$\frac{pV}{T} \sim \frac{1}{m_{mol}} \quad \text{für } m = \text{konst.}$$

Aus den Proportionalitäten (2) und (3) folgt die Proportionalität

(4) $$\frac{pV}{T} \sim \frac{m}{m_{mol}}$$

4.2. Die allgemeine Gaskonstante R_0

Um aus der Proportion (4) eine Gleichung zu erhalten, benutzt man eine Konstante R_0 als Proportionalitätsfaktor. Dadurch erhält man eine neue Form der allgemeinen Zustandsgleichung:

(5)

allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gas	$pV = m \frac{R_0}{m_{mol}} T$

R_0 gilt für alle (idealen) Gase. Diese Konstante hat verschiedene Namen. Man nennt R_0 allgemeine oder universelle oder auch molare Gaskonstante. Für ihren Wert gilt folgende Gleichung:

universelle Gaskonstante	$R_0 = 8{,}314\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

In dieser Gleichung ist J das Symbol für die Energieeinheit Joule.
Die Gleichung (5) benutzt man, wenn man keine Zustandsänderung, sondern einen bestimmten Zustand eines Gases untersuchen will. Da in ihr die Masse als Variable auftritt, gilt diese Gleichung für beliebige, also auch für nicht abgeschlossene Gasmengen.

Lehrbeispiel:

Welche Masse hat die Luft in einem Zimmer von der Größe 4,5 m · 5,2 m · 3,5 m bei einer Temperatur von 24 °C und einem Druck von 9,64 · 10^4 Pa? Die molare Masse der Luft beträgt 29 g mol^{-1}.

S_1 gegeben:

$a = 4{,}5\ \text{m}$ $\quad \vartheta = 24\ °\text{C}$

$b = 3{,}5\ \text{m}$ $\quad p = 9{,}64 \cdot 10^4\ \text{Pa}$

$c = 5{,}2\ \text{m}$ $\quad m_{mol} = 29\ \text{g mol}^{-1}$

gesucht:

m

S_2

$$pV = mR_0T\frac{1}{m_{mol}}$$

$$T/\text{K} = \vartheta/°\text{C} + 273$$

$$V = abc$$

S_3

$$m = \frac{pVm_{mol}}{R_0T} \qquad m = \frac{9{,}64 \cdot 10^4\ \text{Pa} \cdot 4{,}5\ \text{m} \cdot 3{,}5\ \text{m} \cdot 5{,}2\ \text{m} \cdot 29\ \text{g}}{\text{mol} \cdot 8{,}314\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1} \cdot 297\ \text{K}}$$

$$m = \frac{p \cdot a \cdot b \cdot c\ m_{mol}}{R_0(\vartheta/°\text{C} + 273)\ \text{K}} \qquad = \frac{9{,}64 \cdot 10^4 \cdot 4{,}5 \cdot 3{,}5 \cdot 5{,}2 \cdot 29}{8{,}314 \cdot 297}\ \text{g}$$

$$= 92{,}7 \cdot 10^3\ \text{g} = 92{,}7\ \text{kg}$$

$$1\ \text{Pa} = 1\ \text{Nm}^{-2}$$

$$1\ \text{J} = 1\ \text{Nm}$$

allgemeine Lösung — spezielle Lösung

Die Luft in diesem Zimmer hat eine Masse von 92,7 kg.

4.3. Die Isothermen des realen Gases

Wenn man die Zustandsänderungen eines realen Gases mit den Gesetzen für das ideale Gas vergleicht, so stellt man Abweichungen fest, die um so größer sind, je tiefer die Temperatur und je höher der Druck ist. Unter diesen Bedingungen ist nämlich das Gasvolumen relativ klein und die Eigenbewegung der Moleküle gering. Das bedeutet aber, daß das Eigenvolumen der Moleküle und die Kräfte zwischen ihnen nicht vernachlässigt werden dürfen. Das heißt aber, daß die Bedingungen für das ideale Gas nur schlecht erfüllt sind.

▶ Je höher die Temperatur und je tiefer der Druck ist, desto besser sind die Bedingungen für das ideale Gas erfüllt.

Das Diagramm der Isothermen eines realen Gases (Abb. 4.1.) zeigt, daß ein deutlicher Unterschied zwischen dem Verhalten des Gases für Temperaturen unterhalb der Temperatur T_k und dem Verhalten für Temperaturen oberhalb T_k besteht. Für Temperaturen unterhalb T_k kann das Gas verflüssigt werden. Die Verflüssigung beginnt in den Punkten A_i und endet in den Punkten E_i. Während der Verflüssigung bleibt der Druck konstant, und es gibt gleichzeitig Dampf und Flüssigkeit des gleichen Stoffes.

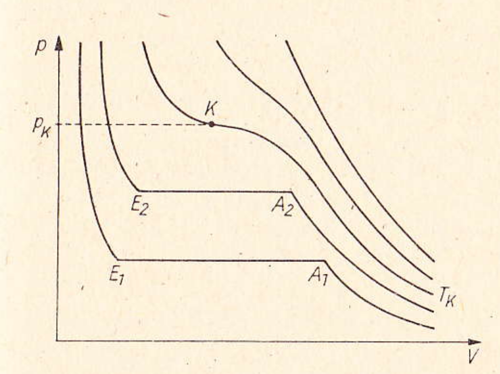


Abb. 4.1. Isothermen eines realen Gases

Für Temperaturen oberhalb T_k ist keine Verflüssigung möglich. Die Isothermen nähern sich immer mehr den Isothermen des idealen Gases. T_k ist die kritische Temperatur des Gases, p_k ist sein kritischer Druck. Den Punkt K bezeichnet man als kritischen Punkt.

▶ Oberhalb seiner kritischen Temperatur ist die Verflüssigung eines Gases unmöglich.

Für Drücke, die viel kleiner sind als ihr kritischer Druck und Temperaturen, die viel höher sind als ihre kritische Temperatur, kann man reale Gase als ideale Gase betrachten.

Tabelle 4.1. Kritische Werte für einige reale Gase

Gas	p_k/Pa	ϑ/°C
Helium	$2{,}3 \cdot 10^5$	−267,9
Wasserstoff	$12{,}9 \cdot 10^5$	−239,8
Sauerstoff	$49{,}9 \cdot 10^5$	−118,8
Kohlendioxid	$73{,}6 \cdot 10^5$	+ 31,5
Luft	$38{,}3 \cdot 10^5$	−140,7
Wasserdampf	$221 \cdot 10^5$	+374,2

Zur Beschreibung des Verhaltens realer Gase kann man folgende Gleichung benutzen:

Zustandsgleichung von *van der Waals*	$\left(p + \frac{am^2}{V^2}\right)(V - mb) = \frac{m}{m_{mol}} R_0 T$

a und b sind stoffspezifische Konstanten.

Wortliste zum Text

bestimmen A
die Definition, -en
die Einschränkung, -en
enthalten A
enthielt, enthalten
die Form, -en
kritisch
die Luft
das Mol, -e (Einheit)
molar
nähern, (sich) D
oberhalb G
spezifisch
unterhalb G
variabel
die Variable, -n
verflüssigen A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum kann man mit der Gleichung $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ nur Zustandsänderungen berechnen?
2) Wie ist die molare Masse definiert?
3) Wieviel Moleküle sind in z mol eines Gases enthalten?

4) Wovon hängt für ein bestimmtes Gas der Term $\frac{pV}{T}$ ab?
5) Gilt die Konstante R_0 für alle Gase?
6) Warum weicht das Verhalten eines realen Gases bei hohem Druck und tiefer Temperatur stark vom Verhalten eines idealen Gases ab?
7) Unter welcher Bedingung kann man ein Gas verflüssigen?
8) Welche Eigenschaft hat der Druck während der Verflüssigung?
9) Warum ist die Verflüssigung von Wasserstoff technisch schwierig?
10) Unter welcher Bedingung kann man ein reales Gas als ideales Gas betrachten?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Abhängigkeit des Terms $\frac{pV}{T}$

Angabe eines Zweckes oder eines Mittels

Beantworten Sie die Fragen in der richtigen grammatischen Form!

(1) Wie erhält man experimentell das Resultat $\frac{pV}{T} \sim m$?

(2) Wie erhält man experimentell das Resultat $\frac{pV}{T} \sim \frac{1}{m_{mol}}$?

(3) Wie erhält man aus der Proportionalität $\frac{pV}{T} \sim \frac{m}{m_{mol}}$ eine Gleichung?

(4) Wozu verwendet man die Gleichung $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$?

(5) Wozu verwendet man die Gleichung $pV = \frac{mR_0T}{m_{mol}}$?

2.2. Die allgemeinen Zustandsgleichungen für das ideale Gas

Interpretieren Sie (vgl. S. 29) die folgenden Gleichungen!

(1) $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

(2) $pV = \frac{mR_0T}{m_{mol}}$

(3) $pV = nR_0T$

2.3. Bedingungen für das Modell ‚ideales Gas'

2.3.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Was versteht man unter einem idealen Gas?
(2) Warum kann man dieses Modell nicht ohne Einschränkung für reale Gase verwenden?

(3) Unter welchen Bedingungen sind die Abweichungen der realen Gase vom Modell besonders groß?
(4) Unter welchen Bedingungen verhalten sich reale Gase wie das Modell?
(5) Was kann man über das Gasvolumen, die Eigenbewegung der Moleküle und die Molekülabstände bei Modellbedingungen sagen?
(6) Unter welchen Bedingungen können Gase verflüssigt werden?

2.3.2. *Notieren Sie* die Antworten zu den 6 Fragen, und *sprechen Sie* zum Thema „Die Bedingungen für das Modell ‚ideales Gas'"!

2.4. Größen und Einheiten

etwas in D an/geben

Bilden und beantworten Sie Fragen! Verwenden Sie dabei das Verb „angeben"!

► In welcher Einheit gibt man den Druck an?
► Den Druck gibt man in .... an.

(1) Druck, (2) Volumen, (3) Temperatur, (4) Masse, (5) molare Masse.

3. Übungen zum Thema

3.1. Ideale und reale Gase

Sprechen Sie über die Isothermen der realen und idealen Gase!
Beachten Sie dabei (1) die unterschiedlichen grafischen Darstellungen, (2) die entsprechenden Zustandsgleichungen und (3) die kritischen Werte und ihre Bedeutung!

3.2. Gasverflüssigung

Informieren Sie sich in einem Lehrbuch der Physik über die Möglichkeiten und die praktische Anwendung der Gasverflüssigung, und *nennen Sie* einige Beispiele!

3.3. Reale Gase

Üben Sie zu zweit!
Informieren Sie sich bei einem Freund über die Eigenschaften der realen Gase oberhalb und unterhalb des kritischen Punktes!

4. Textaufgaben

20. Wie groß ist die Stoffmenge von 1 kg Wasser?
21. Welche Masse haben 10 mol Natriumchlorid?
22. Welche Masse hat ein Wasserstoffatom?
23. Eine zylindrische Gasflasche, die einen Innendurchmesser von 0,2 m und eine Höhe von 1,3 m hat, enthält Kohlendioxid. Welche Masse hat das Gas bei einem Druck von $1{,}28 \cdot 10^7$ Pa und einer Temperatur von 17 °C?
24. Das Volumen einer Gasflasche beträgt 40 l. Wie groß ist der Druck in der Flasche, wenn sie bei 18 °C 4,147 kg Sauerstoff (O_2) enthält?
25. Bei welcher Temperatur haben 58,5 m³ Luft die Masse 71,7 kg, wenn der Luftdruck $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa beträgt? ($m_{mol} = 29 \text{ g mol}^{-1}$)
26. Eine Gasflasche enthält Wasserstoff (H_2) bei einer Temperatur von 20 °C und einem Druck von $1{,}47 \cdot 10^7$ Pa. Wie groß ist die Dichte des Gases?

5. Die Wärmeenergie

5.1. Wärme als Energieform

Die Teilchen der Körper bewegen sich um so schneller, je höher die Temperatur ist. Die kinetische Energie der ungeordneten Bewegung der Teilchen bezeichnet man als Wärmeenergie oder kurz als Wärme. Ihr Symbol ist W_w. Wärmeenergie wird als Wärmemenge von einem System auf ein anderes System übertragen. Wenn man einem Körper eine Wärmemenge zuführt, so erhöht sich seine innere Energie (E_i). Als innere Energie eines thermodynamischen Systems, z. B. eines Gases, bezeichnet man die gesamte Energie, die nur durch den inneren Zustand des Systems bestimmt ist.

► Wärme ist eine Energieform.

Die Einheit der Wärmeenergie ist ein Joule (J).

$[W_w] = 1$ J	(Joule)

Der Zusammenhang der Einheit Joule mit den Einheiten der Grundgrößen des Internationalen Einheitensystems (SI) wird durch die Gleichung $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$ definiert.
s bedeutet dabei die Zeiteinheit Sekunde.

5.2. Die Wärmekapazität

Unter der Wärmekapazität C eines Körpers versteht man den Quotienten aus der zugeführten oder abgegebenen Wärmemenge W_w und der dadurch bewirkten Temperaturänderung $\Delta T = \Delta\vartheta$ des Körpers.

(1)	Wärmekapazität	$C = \frac{W_w}{\Delta T} = \frac{W_w}{\Delta\vartheta}$	$[C] = 1$ J/K

Wenn man die Wärmekapazität eines Körpers kennt, weiß man, welche Wärmemenge man dem Körper zuführen muß, um ihn um 1 K zu erwärmen.
Die auf die Masse bezogene Wärmekapazität c nennt man spezifische Wärmekapazität. Es gilt die Gleichung:

(2)	Spezifische Wärmekapazität	$c = \frac{C}{m}$	$[c] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

Wenn man die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes kennt, weiß man, welche Wärmemenge man einem Kilogramm des Stoffes zuführen muß, um eine Temperaturerhöhung von einem Kelvin zu erhalten.
Aus den Gleichungen (1) und (2) kann man eine Gleichung herleiten, mit der man die zur Erwärmung eines Körpers notwendige Wärmemenge berechnen kann:

(3)	zugeführte Wärmemenge	$W_w = cm\Delta T = cm\Delta\vartheta$

Dabei gilt $\Delta T = \Delta\vartheta = T_2 - T_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$.
Bei Abkühlung muß W_w dem Körper entzogen werden.

Tabelle 5.1. Spezifische Wärmen einiger Stoffe zwischen 0 °C und 100 °C

Stoff	c in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Wasser	$4{,}19 \cdot 10^3$
Eis	$2{,}095 \cdot 10^3$
Aluminium	$0{,}92 \cdot 10^3$
Stahl	$0{,}50 \cdot 10^3$
Kupfer	$0{,}38 \cdot 10^3$

5.3. Die Wärmeübertragung

Wenn zwischen zwei Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen thermischer Kontakt entsteht, so erfolgt eine Wärmeübertragung. Dabei gibt der Körper mit höherer Temperatur die Wärmemenge W_{w1} ab, während der Körper mit der tieferen Temperatur die Wärmemenge W_{w2} aufnimmt.
Die Wärmeübertragung ist beendet, wenn beide Körper die gleiche Temperatur erreicht haben. Diese gemeinsame Temperatur T_M bzw. ϑ_M bezeichnet man als Mischungstemperatur (vgl. Abb. 5.1.).

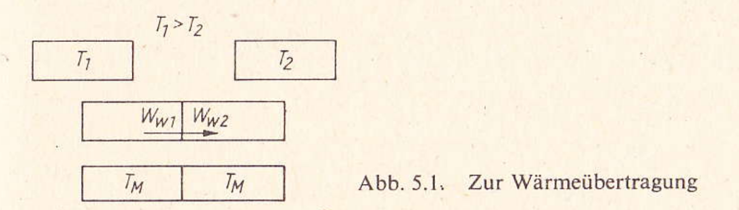


Abb. 5.1. Zur Wärmeübertragung

Wegen des Satzes von der Erhaltung der Energie ist bei der Wärmeübertragung die abgegebene Wärmemenge gleich der aufgenommenen Wärmemenge:

(4)	$W_{w1} = W_{w2}$

Unter Beachtung der Gleichung (3) kann man die Gleichung (4) auch in folgender Form schreiben, die für die Lösung von Aufgaben nützlich ist:

(5)	Wärmeübertragung	$m_1c_1(\vartheta_1 - \vartheta_M) = m_2c_2(\vartheta_M - \vartheta_2)$

■ **Lehrbeispiel:**

Ein heißer Körper aus Stahl mit einer Masse von 10 kg und einer spezifischen Wärmekapazität von $0{,}46 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1} wird zur Abkühlung in 20 Liter (l) Wasser gegeben, das eine Temperatur von 20 °C hat. Es entsteht eine Mischungstemperatur von 60 °C. Welche Anfangstemperatur hatte der Stahlkörper?
Die Wärmekapazität des Gefäßes wird vernachlässigt.

S_1 gegeben:

$c_1 = 0{,}46 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1} $\quad$ $c_2 = 4{,}19 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1}

$m_1 = 10$ kg $\quad$ $V_2 = 20$ l $= 20$ dm^3

$\vartheta_M = 60$ °C $\quad$ $\vartheta_2 = 20$ °C

$\varrho_2 = 1$ kg dm^{-3}

gesucht:

ϑ_1

S_2 $m_1 c_1(\vartheta_1 - \vartheta_M) = m_2 c_2(\vartheta_M - \vartheta_2)$; $\varrho = \frac{m}{V}$

S_3 Allgemeine Lösung

$$\vartheta_1 = \frac{m_2 c_2(\vartheta_M - \vartheta_2) + m_1 c_1 \vartheta_M}{m_1 c_1}$$

$$= \frac{\varrho_2 V_2 c_2(\vartheta_M - \vartheta_2) + m_1 c_1 \vartheta_M}{m_1 c_1} = \vartheta_M + \frac{\varrho_2 V_2 c_2(\vartheta_M - \vartheta_2)}{m_1 c_1}$$

Spezielle Lösung

$$\vartheta_1 = 60\ ^\circ\mathrm{C} + \frac{1\ \mathrm{kg\ dm^{-3}} \cdot 20\ \mathrm{dm^3} \cdot 4{,}19 \cdot 10^3\ \mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}} \cdot 40\ \mathrm{K}}{10\ \mathrm{kg} \cdot 0{,}46 \cdot 10^3\ \mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}}}$$

$$= 60\ ^\circ\mathrm{C} + 728{,}7\ \mathrm{K}$$

$$\vartheta_1 = 788{,}7\ ^\circ\mathrm{C}$$

Der Stahlkörper hatte eine Anfangstemperatur von 788,7 °C.

S_4 Wegen seiner hohen spezifischen Wärmekapazität erwärmt sich das Wasser wenig im Vergleich zur starken Abkühlung des Stahlkörpers.

Wortliste zum Text

beziehen, (sich) A (auf A)
bezog, bezogen
entziehen A
entzog, entzogen
erfolgen
erhalten A
erhielt, erhalten
erhalten bleiben = konstant bleiben
die Grundgröße, -n
innen
innere
das Joule, - (Einheit)
das Kalorimeter, -
der Kontakt, -e
das Liter, -
mischen A
die Mischungstemperatur, -en
nützlich
das Paraffin, -e
das Propanon, o.
der Querschnitt, -e
das System, -e
thermisch
thermodynamisch
übertragen A
übertrug, übertragen
die Wärmekapazität, -en
zu/führen A
der Zusammenhang, ⸗e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter Wärmeenergie?
2) Was versteht man unter innerer Energie?
3) Welche Einheiten der Wärmeenergie benutzt man in der DDR?
4) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Wärmekapazität und der spezifischen Wärmekapazität?
5) Ist die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes konstant?
6) Wovon hängt die Wärmemenge ab, die ein Körper bei Abkühlung abgibt?
7) Welche Folgen hat der thermische Kontakt von zwei Körpern mit verschiedenen Temperaturen?
8) Unter welcher Bedingung erfolgt Wärmeübertragung?
9) Welches Gesetz gilt für die Wärmeübertragung?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Änderung der inneren Energie

zu/führen D A, entziehen D A

Antworten Sie auf die Fragen in Sätzen! Verwenden Sie dabei ‚zuführen' und ‚entziehen'!

(1) Wie ändert sich die Temperatur, wenn man einem Körper eine Wärmemenge zuführt?
(2) Wie ändert sich die Bewegung der Teilchen, wenn man einem Körper eine Wärmemenge entzieht?
(3) Wie nennt man die Wärmemenge, die einem Körper zugeführt oder entzogen wird?
(4) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der zugeführten oder entzogenen Wärmemenge und der Temperaturänderung?
(5) Wie ändert sich die innere Energie beim Zuführen einer Wärmemenge?
(6) Was geschieht in bezug auf die innere Energie, wenn man einem Körper eine Wärmemenge entzieht?

2.2. Wärmeenergie

Attributsatz

Ergänzen Sie den Text durch Substantive und Relativpronomen bzw. Relativpronomen mit Präposition!

Die innere Energie ist eine .... durch den inneren Zustand des Systems bestimmt ist. ⇓ Einheit

1 Joule ist eine ...., ... man für die Wärmeenergie benutzt. Die Wärmekapazität ist eine ...., ... Einheit 1 J/K ist. Die Erwärmung ist ein ...., ... eine Wärmemenge zugeführt wird. Die spezifische Wärmekapazität ist eine ...., ... von der Temperatur abhängt. $W = m \cdot c \cdot \Delta T$ ist eine ...., ... man die Wärmemenge berechnen kann.

Zustandsgröße
Vorgang
Stoffkonstante
Gleichung
physikalische Größe

2.3. Die Auswertung von Diagrammen

Versuche über den Zusammenhang zwischen Wärmemenge, Temperaturänderung, Masse und Stoff ergeben die folgenden Diagramme.
Werten Sie die Diagramme aus, indem Sie die folgenden Fragen beantworten bzw. Aufgaben lösen!

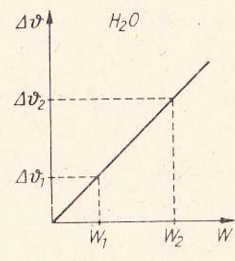


Abb. 5.2.

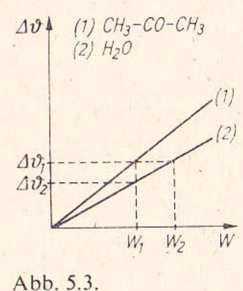


Abb. 5.3.

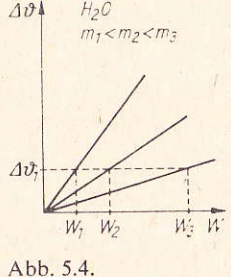


Abb. 5.4.

zu Diagramm 5.2.:

(1) Was geschieht, wenn man 1 kg Wasser die Wärmemenge W_1 zuführt?
(2) Was geschieht, wenn man 1 kg Wasser gleicher Anfangstemperatur die Wärmemenge W_2 zuführt?
(3) Vergleichen Sie die zugeführten Wärmemengen und die Temperatur in bezug auf die Änderung!
(4) Was folgt aus dem Diagramm?

zu Diagramm 5.3.:

(1) Was geschieht, wenn man 1 kg Propanon die Wärmemenge W_1 zuführt?
(2) Was geschieht, wenn man 1 kg Wasser gleicher Anfangstemperatur die Wärmemenge W_2 zuführt?
(3) Vergleichen Sie Wasser und Propanon in bezug auf die zugeführten Wärmemengen, die Masse und die Temperaturänderung!
(4) Was folgt aus dem Diagramm?

zu Diagramm 5.4.:

(1) Was geschieht, wenn man 1 kg, 2 kg und 3 kg Wasser gleicher Anfangstemperatur die Wärmemengen W_1, W_2 und W_3 zuführt?
(2) Vergleichen Sie die Massen in bezug auf die zugeführte Wärmemenge und Temperaturänderung!
(3) Was folgt aus dem Diagramm?

2.4. Die mathematische Beschreibung thermischer Prozesse

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (vgl. S. 29)

(1) $W_W = m c \Delta T$

(2) $m_1 c_1(\vartheta_1 - \vartheta_M) = m_2 c_2(\vartheta_M - \vartheta_2)$

(3) $C = \frac{W_W}{\Delta T}$

(4) $W_{W_1} = W_{W_2}$

(5) $c = \frac{C}{m}$

2.5. Wärmeübertragung

2.5.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Unter welcher Bedingung erfolgt Wärmeübertragung?
(2) In welcher Richtung erfolgt die Wärmeübertragung?
(3) Was wissen Sie über die Dauer der Wärmeübertragung?
(4) Wie beschreibt man mathematisch die Wärmeübertragung?

2.5.2. *Sprechen Sie* über die Wärmeübertragung entsprechend der Übung 2.5.1!.

3. Übungen zum Thema

3.1. Die experimentelle Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität eines festen Körpers

Die spezifische Wärmekapazität eines festen Körpers kann man experimentell bestimmen.
Beschreiben Sie die Durchführung des Experimentes, und beachten Sie dabei die folgenden Hinweise!

(1) Bestimmung der Masse des festen Körpers
(2) Bestimmung der Wärmekapazität des Kalorimeters
(3) Erwärmung von Wasser bis zur Siedetemperatur
(4) Erwärmung des festen Körpers mit Hilfe des Wassers
(5) Kalorimeter mit einer bekannten Wassermenge füllen
(6) Bestimmung der Wassertemperatur im Kalorimeter
(7) festen Körper in Kalorimeter bringen
(8) Bestimmung der Mischungstemperatur
(9) Berechnung der spezifischen Wärmekapazität aus den gemessenen Größen

3.2. Die spezifische Wärmekapazität verschiedener Stoffe

Drei Metallzylinder (vgl. Abb. 5.5.) gleicher Masse und gleichen Querschnitts werden auf die gleiche Temperatur erwärmt. Dann werden sie auf einen Paraffinblock gestellt.
Erklären Sie das Versuchsergebnis mit Hilfe der Theorie über die Wärmemenge, spezifische Wärmekapazität und der Wärmeübertragung!

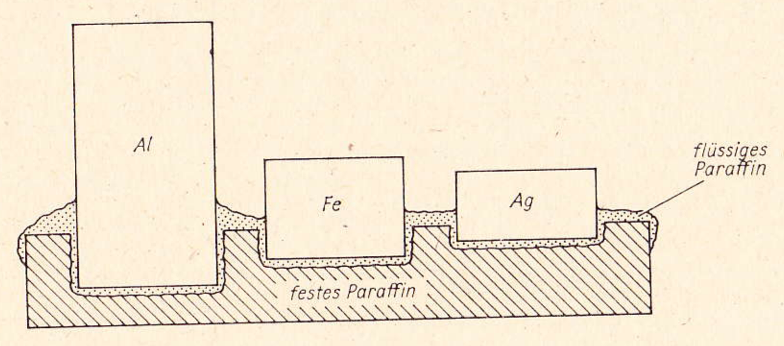


Abb. 5.5.

3.3. Tabelle für die spezifische Wärmekapazität

3.3.1. *Üben Sie zu zweit!*
Informieren Sie sich bei einem Freund über die spezifische Wärmekapazität verschiedener Stoffe, indem Sie fragen: „Welche spezifische Wärmekapazität hat ...?“ Ihr Freund beantwortet die Frage mit Hilfe einer Tabelle.

3.3.2. *Sprechen Sie* über die Bedeutung der spezifischen Wärmekapazität des Wassers für die Natur und die Technik!

3.4. Experimenteller Nachweis des Zusammenhangs $W_w = m\,c\,\Delta T$

Sprechen Sie über den experimentellen Nachweis des Zusammenhangs zwischen der Wärmemenge und der Masse bzw. der Temperaturänderung!

4. Textaufgaben

27. Zur Erwärmung eines Kalorimeters von 20 °C auf 54 °C braucht man eine Wärmemenge von 8,8 kJ. Wie groß ist die Wärmekapazität des Kalorimeters?

28. Ein Körper aus Eisen mit einer Masse von 0,54 kg wird von 15 °C auf 600 °C erwärmt. Welche Wärmemenge nimmt er dabei auf?
(c = 0,46 k J/kg K)

29. Wenn man einem Körper von 200 g Masse eine Wärmemenge von $1{,}68 \cdot 10^3$ J zuführt, erwärmt er sich um 21,7 K. Wie groß ist die spezifische Wärmekapazität des Körpers?

30. In einem Gefäß befinden sich 80 kg Wasser mit einer Temperatur von 75 °C. Das Wasser soll auf 45 °C abgekühlt werden. Dazu benutzt man kaltes Wasser, das eine Temperatur von 16 °C hat. Wieviel kg kaltes Wasser muß man zum warmen Wasser dazugeben?

31. 50 cm³ Tee von 65 °C werden in ein Aluminiumgefäß gegossen, das eine Masse von 120 g und eine Temperatur von 12 °C hat. Welche Temperatur nimmt der Tee dabei an?

32. Es soll die spezifische Wärmekapazität eines Körpers bestimmt werden, der eine Masse von 270 g hat. Dazu wird der Körper auf 100 °C erwärmt und in ein Kalorimeter gebracht, das 450 g Wasser von 18 °C enthält. Die Wärmekapazität des Kalorimeters beträgt 167,6 J K^{-1}. Dabei entsteht eine Mischungstemperatur von 22 °C. Welche spezifische Wärmekapazität erhält man für den Körper?

33. In einem Kalorimeter befinden sich 150 g Wasser von 17 °C. Man gibt 65 g Wasser von 45 °C dazu und erhält eine Mischungstemperatur von 25 °C. Wie groß ist die Wärmekapazität des Kalorimeters?

6. Die Änderung des Aggregatzustandes

6.1. Die Charakterisierung der Aggregatzustände

Körper können fest, flüssig oder gasförmig sein. Ein Stück Eisen ist fest, Wasser ist flüssig und Luft ist gasförmig. Diese drei Zustände bezeichnet man als die drei Aggregatzustände, und man unterscheidet den festen Aggregatzustand, den flüssigen Aggregatzustand und den gasförmigen Aggregatzustand.
Der feste Aggregatzustand ist gekennzeichnet durch die Kristallstruktur. Das bedeutet, daß die Teilchen eines festen Körpers durch die Kohäsionskräfte, die zwischen ihnen wirken, in einem System angeordnet sind, in dem sie bestimmte Positionen haben und fast nicht gegeneinander beweglich sind. Aus der Kristallstruktur der festen Körper ergibt sich, daß sie eine bestimmte Form und ein bestimmtes Volumen haben.
Die Teilchen eines flüssigen Körpers haben zwar noch einen bestimmten mittleren Abstand, aber keine bestimmte Position. Sie sind leicht gegeneinander beweglich. Darum kann die Flüssigkeit fließen, und man kann sie von einem Gefäß in ein anderes gießen. Ein flüssiger Körper hat ein bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Form.
In einem Gas kann man die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen im allgemeinen vernachlässigen. Die Teilchen eines Gases bewegen sich nahezu frei. Ein Gas hat deshalb keine bestimmte Form und kein bestimmtes Volumen. Im Gegen-

satz zum festen Körper und zur Flüssigkeit besitzt es einen (inneren) Druck, so daß es sich ausdehnen kann. Es versucht dadurch stets das größte Volumen einzunehmen, das unter den gegebenen Bedingungen möglich ist.
Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Aggregatzustand eines Körpers vom Grad der Ordnung seiner Teilchen, von ihrer Wirkung aufeinander und von ihrer Beweglichkeit gegeneinander abhängt.

6.2. Die Änderung des Aggregatzustandes

6.2.1. Schmelzen und Erstarren

Führt man einem festen Körper eine Wärmemenge zu, so erhöht sich zuerst in Abhängigkeit von seiner Masse und seiner spezifischen Wärmekapazität seine Temperatur. Man kommt dabei zu einer bestimmten Temperatur, bei der keine weitere Temperaturerhöhung erreicht werden kann, obwohl dem Körper weiter eine Wärmemenge zugeführt wird. Der Körper beginnt vom festen in den flüssigen Aggregatzustand überzugehen. Dieser Prozeß wird als Schmelzen bezeichnet. Dabei wird die Kristallstruktur des festen Körpers zerstört.
Die Wärmemenge, die 1 kg eines Stoffes während des Schmelzens aufnimmt, nennt man Schmelzwärme. Man bezeichnet die spezifische Schmelzwärme mit q_s. Sie ist der Quotient aus der während des Schmelzens aufgenommenen Wärmemenge W_{ws} und der Masse des Stoffes.

spezifische Schmelzwärme	$q_s = \frac{W_{ws}}{m}$	$[q_s] = 1 \frac{J}{kg}$

Während des Schmelzens bleibt die Temperatur konstant. Diese Temperatur nennt man die Schmelztemperatur. Schmelztemperatur und spezifische Schmelzwärme sind Materialkonstanten. Wenn der Körper vollständig geschmolzen ist, steigt bei weiterer Zufuhr einer Wärmemenge die Temperatur wieder an, wobei eine andere spezifische Wärme gilt, nämlich die der nun vorhandenen Flüssigkeit (vgl. Abb. 6.1.).
Der beschriebene Prozeß ist umkehrbar. Wenn der Flüssigkeit eine Wärmemenge entzogen wird, so beginnt sie bei einer bestimmten Temperatur, der Erstarrungstemperatur, in den festen Aggregatzustand überzugehen, d. h. zu erstarren. Die Erstarrungstemperatur ist gleich der Schmelztemperatur. Die vorher zugeführte Schmelzwärme wird dabei frei, man nennt sie Erstarrungswärme. Die Schmelztemperatur ist druckabhängig, und zwar steigt sie im allgemeinen bei Druckerhöhung. Jedoch erhalten wir bei Wasser auf Grund der Anomalie des Wassers bei höherem Druck eine tiefere Schmelztemperatur.
Die Tabellen geben stets die Schmelztemperatur der reinen Stoffe an. Wenn andere Stoffe in ihnen gelöst sind, so wird dadurch die Schmelztemperatur verringert. Eine Salzlösung hat deshalb einen tieferen Schmelzpunkt als reines Wasser.

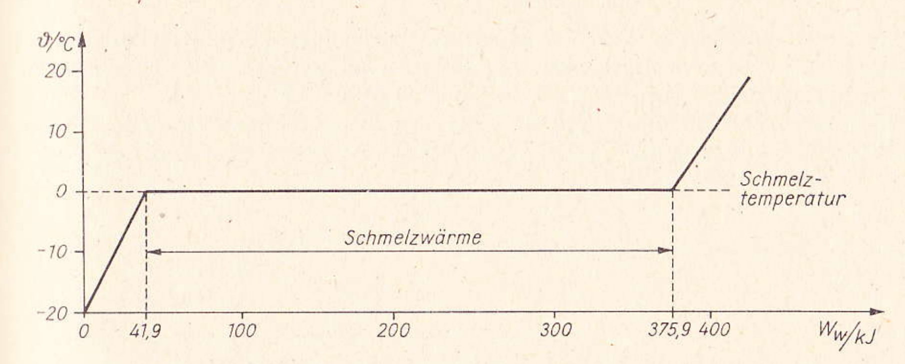


Abb. 6.1. Abhängigkeit der Temperatur von der zugeführten Wärmemenge für 1 kg Wasser

Tabelle 6.1. Schmelztemperaturen und spezifische Schmelzwärmen einiger Stoffe bei $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa

Stoff	Schmelztemperatur in °C	Spezifische Schmelzwärme in kJ/kg
Aluminium	659	398
Blei	327	25,1
Eis	0	334
Eisen, rein	1537	268
Gold	1063	62,8
Quecksilber	−39	11,3
Wasserstoff	−262	58,6

6.2.2. Verdampfen und Kondensieren

Der Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Aggregatzustand heißt Verdampfen, der umgekehrte Vorgang wird als Kondensieren bezeichnet.
Für das Verdampfen gibt es zwei Formen: das Sieden und das Verdunsten. Der Prozeß des Siedens erfolgt im gesamten Volumen der Flüssigkeit. Im Gegensatz dazu läuft der Prozeß des Verdunstens nur an der Oberfläche der Flüssigkeit ab und zwar bei Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur.
Während des Siedens bleibt die Temperatur konstant. Die Flüssigkeit nimmt dabei die Verdampfungswärme auf. Man bezeichnet die spezifische Verdampfungswärme mit q_v. Sie ist der Quotient aus der während des Verdampfens aufgenommenen Wärmemenge W_{wv} und der Masse des Körpers.

spezifische Verdampfungswärme	$q_v = \frac{W_{wv}}{m}$	$[q_v] = 1 \frac{J}{kg}$

Die Umwandlungswärmen q_s und q_v, die man auch als latente Wärmen bezeichnet, geben an, welche Wärmemenge 1 kg eines Stoffes während der Änderung des Aggregatzustandes aufnimmt bzw. abgibt (vgl. Abb. 6.2.).
Die Siedetemperatur erhöht sich mit steigendem Druck. Weiter ist die Siedetemperatur einer Lösung größer als die Siedetemperatur des reinen Lösungsmittels.

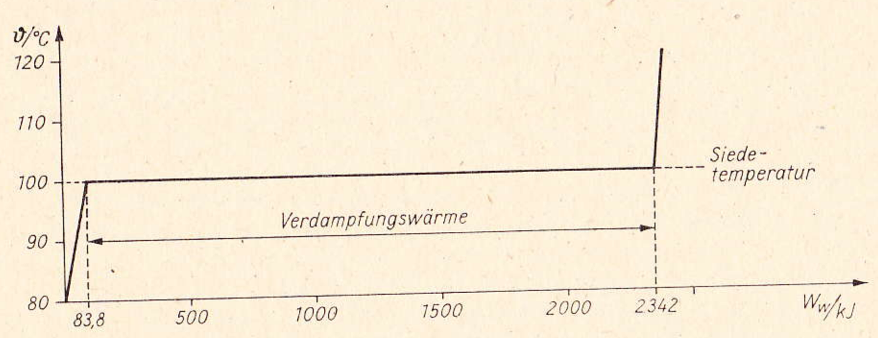


Abb. 6.2. Abhängigkeit der Temperatur von der zugeführten Wärmemenge für 1 kg Wasser

Tabelle 6.2. Siedetemperaturen und spezifische Verdampfungswärmen einiger Stoffe bei 1,013 10^5 Pa

Stoff	Siedetemperatur in °C	Spezifische Verdampfungswärme in kJ/kg
Blei	1753	851
Quecksilber	357	285
Wasser	100	2258
Wasserstoff	−253	469

Lehrbeispiel:

Ein Gefäß, das eine Wärmekapazität von $5{,}44 \cdot 10^3$ J K^{-1} hat, ist mit 12 kg Wasser von 15 °C gefüllt. In dieses Gefäß leitet man bei $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa Druck 850 g Wasserdampf von 100 °C. Der Dampf kondensiert im Wasser. Wie groß ist die Mischungstemperatur? (Die Kondensationswärme ist gleich der Verdampfungswärme.)

S_1 gegeben:

$m_1 = 850$ g $\qquad m_2 = 12$ kg

$p = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa $\qquad \vartheta_2 = 15$ °C

$\vartheta_1 = 100$ °C $\qquad q_v = 2258 \cdot 10^3$ J kg^{-1}

$C = 5{,}44 \cdot 10^3$ J K^{-1}

$c = 4{,}19 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1}

gesucht:

ϑ_M

S_2 $\quad W_{w1} = W_{w2}; \qquad W_{wv} = q_v m; \qquad W_w = c\,m\,\Delta\vartheta$

Da der Druck $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa beträgt, kondensiert der Dampf bei 100 °C.

S_3 Abgegebene Wärmemengen:

Dampf beim Kondensieren $\quad W_{ab1} = q_v \cdot m_1$

Wasser beim Abkühlen $\quad W_{ab2} = c \cdot m_1(\vartheta_1 - \vartheta_M)$

Aufgenommene Wärmemengen:

kaltes Wasser $\quad W_{auf1} = c\,m_2(\vartheta_M - \vartheta_2)$

Gefäß $\quad W_{auf2} = C(\vartheta_M - \vartheta_2)$

$$q_v m_1 + m_1 c(\vartheta_1 - \vartheta_M) = m_2 c(\vartheta_M - \vartheta_2) + C(\vartheta_M - \vartheta_2)$$

$$\vartheta_M(m_1 c + m_2 c + C) = q_v m_1 + m_1 c\,\vartheta_1 + m_2 c\,\vartheta_2 + C\vartheta_2$$

allgemeine Lösung:

$$\vartheta_M = \frac{c\,(m_1\vartheta_1 + m_2\vartheta_2) + q_v m_1 + C\vartheta_2}{c(m_1 + m_2) + C}$$

spezielle Lösung:

$$\vartheta_M = \frac{4{,}19 \cdot 10^3(0{,}85 \cdot 100 + 12 \cdot 15) + 2258 \cdot 10^3 \cdot 0{,}85 + 5{,}44 \cdot 10^3 \cdot 15\ °C}{4{,}19 \cdot 10^3(0{,}85 + 12) + 5{,}44 \cdot 10^3}$$

Untersuchung der Einheiten:

$$\frac{\text{J kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}\,\text{kg °C} + \text{J kg}^{-1}\,\text{kg} + \text{J K}^{-1}\,\text{°C}}{\text{J kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}\,\text{kg} + \text{J K}^{-1}} = °C + K + °C \rightarrow °C,$$

weil K hier die Einheit einer Temperaturdifferenz ist.

$$\vartheta_M = \frac{1110 + 1920 + 81{,}5}{53{,}7 + 5{,}44}\ °C = \frac{3111{,}5}{59{,}14}\ °C = 52{,}5\ °C$$

Die Mischungstemperatur beträgt 52,5 °C.

S_4 Die relativ große Erwärmung von 12 kg Wasser durch 0,85 kg Dampf zeigt die große Kondensationswärme von Wasserdampf.
Die Berechnung der Einheiten wird einfacher, wenn man als Einheit für die Temperaturen nicht °C sondern K nimmt. Denn dann erhält man als Einheit des Ergebnisses sofort $\frac{\text{J}}{\text{J K}^{-1}} = \text{K}$.

6.2.3. Sublimieren

Manche Stoffe können direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Diesen Prozeß und seine Umkehrung bezeichnet man als Sublimieren. Der flüssige Aggregatzustand tritt dabei nicht auf. Diese Erscheinung wird bei festem Kohlendioxid, Iod, Ammoniumchlorid (NH_4Cl) und unter bestimmten Bedingungen bei Wasser beobachtet.

6.3. Das Gesetz vom Umschlagen quantitativer Veränderungen in qualitative Veränderungen

Die Erwärmung eines festen Körpers und die damit verbundene Temperaturerhöhung sind quantitative Veränderungen innerhalb einer bestimmten Qualität: Die Quantitäten Wärmeenergie und Temperatur werden vergrößert, wobei zunächst die Qualität des festen Aggregatzustandes konstant bleibt. Wenn die zugeführte Wärmeenergie und damit die Temperatur ein bestimmtes Maß erreicht haben, ergibt sich plötzlich eine neue Qualität, der flüssige Aggregatzustand. Diese qualitative Veränderung bezeichnet man als das Umschlagen in eine neue Qualität. Damit ist gezeigt, daß die kontinuierliche Änderung einer Quantität zu einer plötzlichen (diskontinuierlichen) Änderung einer Qualität führen kann. Weitere Beispiele lassen sich in allen Wissensgebieten finden. Der genannte Zusammenhang ist ein objektiv wirkendes, allgemeines Grundgesetz der materialistischen Dialektik.

Wortliste zum Text

ab/laufen
lief ab, abgelaufen (sein)
der Abstand, ⸚e
der Aggregatzustand, ⸚e
das Ammoniumchlorid, o.
an/ordnen A (aufbauen)
das Blei, o.
charakterisieren A
die Dialektik, o.
ein/nehmen A
nahm ein, eingenommen
entgegen/wirken D
ergeben, sich aus D
ergab, ergeben
erstarren
fließen
floß, geflossen (sein)
gasförmig
gegeneinander
der Gegensatz, ⸚e
gießen A
goß, gegossen
das Gold, o.
das Grundgesetz, -e
das Iod, o.
kennzeichnen A
die Kohäsion, o.
das Kohlendioxid, o.
die Kondensationswärme, -n
kondensieren (sein)
kontinuierlich
-diskontinuierlich
der Kristall, -e
latent
das Maß, -e
materialistisch
plötzlich
die Position, -en

der Prozeß, Prozesse
qualitativ
die Quantität, -en
rein
das Salz, -e
schmelzen (sein)
schmolz, geschmolzen
die Schmelztemperatur, -en
die Schmelzwärme, -n
sieden
die Siedetemperatur, -en
stets
die Struktur, -en
sublimieren
teilweise
der Übergang, ⸚e
überwinden A
überwand, überwunden
um/schlagen in A
schlug um, umgeschlagen
um/wandeln A in A
die Umwandlungswärme, -n
verdampfen (sein)
die Verdampfungswärme, -n
verdunsten (sein)
der Wasserstoff, o.
zunächst

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum haben feste Körper eine bestimmte Form und ein bestimmtes Volumen?
2) Warum haben flüssige Körper keine bestimmte Form?
3) Wodurch unterscheiden sich die Aggregatzustände?
4) Wie kann man den Aggregatzustand eines Körpers ändern?
5) Was versteht man unter Schmelzen (Erstarren)?
6) Was versteht man unter Verdampfen (Kondensieren)?
7) Wodurch unterscheiden sich Sieden und Verdunsten?
8) Welche Umwandlungswärmen gibt es und wie sind sie definiert?
9) Warum bleibt die Temperatur während der Umwandlung konstant?
10) Was sagt das Gesetz vom Umschlagen quantitativer Veränderungen in qualitative Veränderungen?

2. Übungen zum Text

2.1. Kohäsionskräfte und Energie der Teilchen

Ergänzen Sie den Text!

Zwischen den Teilchen jedes Körpers wirken .... Durch die kinetische Energie der Teilchen können die Kohäsionskräfte .... werden. Es entstehen Kräfte, die den Kohäsionskräften ....

entgegenwirken
Kohäsionskräfte
überwinden

Deshalb sind die Teilchen einer Flüssigkeit nicht fest .... Bei einem Gas kann man die Kohäsionskräfte im allgemeinen .... Der feste .... ist durch die .... gekennzeichnet.

anordnen
Aggregatzustand
Kristallstruktur
vernachlässigen

2.2. Die Charakterisierung der Aggregatzustände

Vergleichen Sie feste, flüssige und gasförmige Körper
(1) in bezug auf die Form und das Volumen
(2) in bezug auf die Anordnung der Atome und Moleküle!

2.3. Die Änderung der Aggregatzustände

2.3.1. *Bilden und beantworten Sie Fragen!*

über/gehen von D in A

► Bei welcher Temperatur geht ein Körper vom festen in den flüssigen Aggregatzustand über?
► Bei der Schmelztemperatur geht ein Körper vom festen in den flüssigen Aggregatzustand über.

(1) fest – flüssig
(2) flüssig – gasförmig
(3) gasförmig – flüssig
(4) flüssig – fest.

2.3.2. *Beantworten Sie* die Fragen in der richtigen grammatischen Form! Auf eine Frage sind mehrere Antworten möglich.

Angabe einer Bedingung

(1) Unter welcher Bedingung steigt die Temperatur eines Körpers?
(2) Unter welcher Bedingung bleibt trotz Energiezufuhr die Temperatur eines Körpers konstant?
(3) Unter welcher Bedingung bleibt trotz Wärmeentzug die Temperatur eines Körpers konstant?
(4) Unter welcher Bedingung fällt die Temperatur eines Körpers?

2.4. Die Definition wichtiger Begriffe

Attributsatz

Die Definition eines Begriffes besteht oft aus drei Teilen
(1) Begriff, der definiert wird, (2) Oberbegriff zum Begriff, (3) charakteristische Eigenschaft des Begriffes bezüglich des Oberbegriffs.

► Das Schmelzen ist ein (eine) Vorgang (Aggregatzustandsänderung), bei dem (der) der Körper vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht.
oder:
► Unter Schmelzen versteht man ...

Definieren Sie die folgenden Begriffe!

(1) Schmelzen,
(2) Schmelzwärme,
(3) Schmelztemperatur,
(4) Erstarren,
(5) Erstarrungswärme,
(6) Erstarrungstemperatur,
(7) Verdampfen,
(8) Verdampfungswärme,
(9) Kondensieren,
(10) Sublimieren

2.5. Die grafische Darstellung des Schmelzens von Eis

Beschreiben Sie das Diagramm der Abb. 6.1., indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Was geschieht, wenn man Eis von −20 °C eine Wärmemenge zuführt?
(2) Bis zu welcher Temperatur erwärmt sich das Eis?
(3) Was geschieht, wenn man weiter Wärme zuführt?
(4) Wieviel Joule muß man zuführen, damit 1 kg Eis von 0 °C vollständig schmilzt?
(5) Wie lange bleibt die Temperatur konstant?
(6) Was geschieht, wenn man nach Beendigung des Schmelzens weiter Wärme zuführt?

2.6. Die grafische Darstellung des Verdampfens von Wasser

Beschreiben Sie das Diagramm der Abb. 6.2. (vgl. Übung 2.5.)!

3. Übungen zum Thema

3.1. Sieden und Verdunsten

Vergleichen Sie die beiden Prozesse in bezug auf
(1) die Änderung des Aggregatzustandes
(2) die Temperatur bei diesen Vorgängen
(3) die Dauer des Vorgangs!

3.2. Die Auswertung von Diagrammen

Begründen Sie mit Hilfe der Begriffe Schmelztemperatur, Schmelzwärme und spezifische Wärmekapazität, warum das Diagramm (vgl. Abb. 6.1.) den Übergang von H_2O vom festen in den flüssigen Zustand darstellt!

3.3. Temperaturen bei Aggregatzustandsänderungen

schmelzen, sieden, erstarren, kondensieren

Üben Sie zu zweit!
Informieren Sie sich bei einem Freund über die Temperaturen bei Aggregatzustandsänderungen verschiedener Stoffe! Ihr Freund beantwortet Ihre Fragen mit Hilfe einer Tabelle.

► Bei welcher Temperatur schmilzt (erstarrt, siedet, kondensiert) ...?

3.4. Die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur

Sprechen Sie über ein Experiment, das die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur nachweist!

3.5. Sublimieren

Informieren Sie sich in einem Lehrbuch für Physik über den Vorgang des Sublimierens, und nennen Sie einige Stoffe, die sublimieren!

4. Textaufgaben

34. In einem Gefäß befinden sich 25 g Wasser von 15 °C. Welche Wärmemenge muß man dem Wasser zuführen, um es zu verdampfen?

35. Wie groß ist die Wärmemenge, die frei wird, wenn 25 kg flüssiges Aluminium von 700 °C erstarren und sich auf 20 °C abkühlen?
($q_s = 3{,}98 \cdot 10^5$ J/kg)

36. Welche Wärmemenge braucht man, um 100 kg Stahl zu schmelzen, wenn die Anfangstemperatur 15 °C beträgt?
Die spezifische Wärmekapazität beträgt $6{,}98 \cdot 10^2$ J/kg · K, die Schmelztemperatur 1 450 °C und die spezifische Schmelzwärme 146 kJ/kg.

37. Welche Wärmemenge wird gebraucht, um 2 kg Eis von −8 °C in Wasser von 80 °C umzuwandeln? ($c = 2{,}095 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1})

38. In 1 l Wasser von 20 °C wird 1 kg Eis von 0 °C gegeben. Wieviel Eis schmilzt, und wie groß ist dann die Temperatur des Wassers?

39. Wieviel kg Dampf von 100 °C muß man mit 800 l Wasser von 12 °C mischen, damit das Wasser siedet?

40. Wieviel Gramm Wasserdampf mit einer Temperatur von 100 °C müssen in 1 l Wasser von 16 °C kondensieren, damit die Temperatur auf 80 °C steigt?

***41.** 10 kg kaltes Wasser von 12 °C sollen auf eine Temperatur von 45 °C erwärmt werden. Es stehen 3 kg heißes Wasser von 70 °C und Wasserdampf von 100 °C zur Verfügung. Wieviel Wasserdampf wird noch gebraucht?

7. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

7.1. Der Weg zum 1. Hauptsatz

Die Erkenntnis, daß Wärme eine Form der Energie ist, folgt aus vielen Erfahrungen. So erwärmt sich ein Werkstück, wenn man es mechanisch bearbeitet. Das Reiben der Hände führt zu ihrer Erwärmung.
Vor den Physikern des 19. Jahrhunderts stand die Aufgabe, zu zeigen, daß Wärme

eine Form der Energie ist und daß man sie in einem bestimmten konstanten Verhältnis in andere Energieformen umwandeln kann.

1842 berechnete der deutsche Arzt *J. R. Mayer* mit Hilfe eines Gedankenexperiments den Betrag der mechanischen Arbeit, der einer bestimmten Wärmemenge äquivalent ist. Seine Erkenntnisse wurden aber wenig beachtet.

Kurz danach konnte der Engländer *J. P. Joule* einen ähnlichen Wert mit Hilfe eines Versuches praktisch bestätigen.
Joule benutzte ein Kalorimeter, das mit einer Flüssigkeit gefüllt war (vgl. Abb. 7.1.). Durch Drehen eines Rührwerkes erwärmte sich die Flüssigkeit. Die Wärmemenge, die dabei der Flüssigkeit zugeführt wird, läßt sich berechnen. Sie ist der mechanischen Arbeit gleichwertig, die von den beiden Massestücken verrichtet wird.

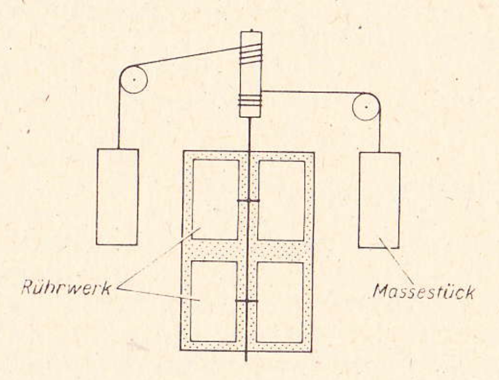


Abb. 7.1. *Joule*sches Experiment

7.2. Formulierungen des 1. Hauptsatzes

Der erste Hauptsatz ist der Energiesatz für thermodynamische Systeme. Ein thermodynamisches System ist ein System, dessen Zustand durch thermodynamische Größen, z. B. Temperatur, Druck, Volumen, beschrieben werden kann. Der 1. Hauptsatz ist ein Erfahrungssatz. Es gibt mehrere Formulierungen des 1. Hauptsatzes. Diese Formulierungen haben alle den gleichen Inhalt. Sie unterscheiden sich nur in der Betrachtungsweise.

7.2.1. Erste Formulierung des 1. Hauptsatzes

Jedes thermodynamische System hat eine Zustandsgröße, die innere Energie E_i (vgl. Text 5.). Diese innere Energie kann von außen auf zwei Arten geändert werden:

a) durch Zuführung oder Entziehung einer Wärmemenge W_w
b) durch Zuführung oder Verrichtung mechanischer Arbeit W_m.

Also gilt für die Änderung der inneren Energie:

(1) | 1. Hauptsatz | $\Delta E_i = W_w + W_m$ |

▶ Die Änderung der inneren Energie eines thermodynamischen Systems ist gleich der Summe aus der zugeführten oder entzogenen Wärmemenge und der zugeführten oder vom System verrichteten mechanischen Arbeit.

Die zugeführten Größen werden positiv gerechnet, die abgegebenen negativ. Ein thermodynamisches System ist abgeschlossen, wenn es keine Wärmemenge oder mechanische Arbeit aufnimmt oder abgibt. In der Gleichung des ersten Hauptsatzes sind also W_w und W_m gleich 0. Dann ist auch die Änderung der inneren Energie gleich 0. Also gilt als Spezialfall der Satz:

▶ In einem abgeschlossenen thermodynamischen System ist die innere Energie konstant.

7.2.2. Zweite Formulierung des 1. Hauptsatzes

Eine andere Formulierung des 1. Hauptsatzes erhält man, wenn man fragt, ob es eine periodisch arbeitende Maschine geben kann, die dauernd Arbeit verrichtet, ohne daß von außen die entsprechende Menge Energie zugeführt wird. Eine solche Maschine nennt man Perpetuum mobile 1. Art. Da in einem periodischen Prozeß die innere Energie insgesamt konstant bleiben muß, ist nach (1) jede Verrichtung von mechanischer Arbeit mit der Aufnahme der entsprechenden Wärmemenge verbunden. Daraus folgt die zweite Form des 1. Hauptsatzes:

▶ Es gibt kein Perpetuum mobile 1. Art.

7.2.3. Eine dritte Formulierung des 1. Hauptsatzes lautet:

▶ Wärmeenergie und mechanische Energie können ineinander umgewandelt werden. Eine bestimmte Wärmeenergie entspricht immer der gleichen mechanischen Energie und umgekehrt. Der Zusammenhang zwischen den beiden Energieformen ist von der Art der Umwandlung unabhängig.

Wortliste zum Text

ähnlich D
äquivalent
bearbeiten A
bestätigen A
betrachten A
die Betrachtungsweise, -n
drehen A
die Erfahrung, -en
die Erkenntnis, -se
formulieren A
füllen A
ineinander
das Massestück, -e
mechanisch
periodisch
das Perpetuum mobile, -
reiben A
rieb, gerieben
rühren A
das Rührwerk, -e
sowohl ... als auch ...
verrichten A
eine Arbeit verrichten
das Werkstück, -e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Beispiele zeigen, daß Wärme aus mechanischer Arbeit entstehen kann?
2) Welche Energieformen setzte *Joule* bei der Auswertung seines Experimentes gleich?
3) Was konnte *Joule* mit seinem Experiment zeigen?
4) Wie ist ein thermodynamisches System definiert?
5) Warum gibt es verschiedene Formulierungen des 1. Hauptsatzes?
6) Wie kann die innere Energie eines thermodynamischen Systems geändert werden?
7) Was kann man über die innere Energie eines abgeschlossenen Systems aussagen?
8) Unter welcher Voraussetzung ist die Änderung der inneren Energie negativ?
9) Was ist ein Perpetuum mobile 1. Art?
10) Was kann man über den Zusammenhang von Wärmeenergie und mechanischer Energie sagen?

2. Übungen zum Text

2.1. Das Joulesche Experiment

Ergänzen Sie den Text!

J. P. Joule konnte mit seinem Experiment ...., daß ein bestimmter Betrag der mechanischen Arbeit einer bestimmten Wärmemenge .... ist. Für das Experiment benutzte er ein ...., das mit einer Flüssigkeit gefüllt war. Das Rührwerk dreht sich beim .... der Massestücke. Die Flüssigkeit erwärmt sich beim .... des Rührwerkes. Die Wärmemenge und die .... Arbeit muß man .... und vergleichen.

äquivalent
sinken
bestätigen
drehen
Kalorimeter
berechnen
mechanisch

2.2. Die Formulierungen des 1. Hauptsatzes

Ergänzen Sie den Text!

Der 1. Hauptsatz ist ein ....

Die Formulierungen des 1. Hauptsatzes unterscheiden sich nur in der ....

Die innere Energie ist eine ....

(1) Die Änderung der inneren Energie eines .... Systems ist gleich der Summe aus der zugeführten oder .... Wärmemenge bzw. der zugeführten oder der vom System .... Arbeit.
(2) In einem .... System ist die innere Energie konstant.
(3) Es gibt kein ....

Perpetuum mobile
thermodynamisch
Betrachtungsweise
verrichten
abschließen
Erfahrungssatz
entziehen
Zustandsgröße

2.3. Die Definition wichtiger Begriffe

2.3.1. *Definieren Sie* die folgenden Begriffe!

Attributsatz

(1) thermodynamisches System, (2) abgeschlossenes System, (3) Perpetuum mobile, (4) Erfahrungssatz

2.3.2. *Definieren Sie* die Begriffe der Übung 2.3.1. mit Hilfe von Konditionalsätzen!

Konditionalsatz

► Ein System ist thermodynamisch, wenn ...

2.4. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

2.4.1. *Interpretieren Sie* die Gleichung $\Delta E_i = W_w + W_m$!

2.4.2. *Beantworten Sie* die folgenden Fragen!

Angabe einer Bedingung

(1) Unter welcher Bedingung kann man von einem thermodynamischen System sprechen?
(2) Unter welcher Bedingung kann sich die innere Energie eines thermodynamischen Systems ändern?

(3) Unter welcher Bedingung ist ein System abgeschlossen?
(4) Unter welcher Bedingung ist die innere Energie eines Systems konstant?
(5) Unter welcher Bedingung ist eine Maschine ein Perpetuum mobile?

3. Übungen zum Thema

3.1. Das Joulesche Experiment

Sprechen Sie über das *Joule*sche Experiment! Verwenden Sie in Ihrem Vortrag die folgende Gliederung:

(1) Ziel des Experimentes
(2) Aufbau und Geräte des Experimentes
(3) Ablauf des Experimentes
(4) Ergebnis des Experimentes
(5) Verallgemeinerung des Ergebnisses!

3.2. Die Bedeutung des 1. Hauptsatzes in der Technik

Sprechen Sie über einige Prozesse in der Technik, bei denen die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie bzw. umgekehrt Bedeutung hat!

4. Textaufgaben

42. Die beiden Massestücke des *Joule*schen Versuchs (vgl. Abb. 6.1.) haben eine Masse von je 2 kg und bewegen sich um 5 m nach unten. Die Wärmekapazität von Kalorimeter und Rührwerk beträgt 335 J/K. Im Kalorimeter befinden sich 600 g Wasser. Berechnen Sie die Erwärmung des Wassers!

43. Ein Stück Eisen mit der Masse $m = 100$ kg fällt aus einer Höhe von $h = 20$ m auf die Erde. Um wieviel K erwärmt sich das Eisen dabei, wenn die gesamte potentielle Energie zur Erwärmung des Eisens genutzt wird? ($c = 0{,}46 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1})

8. Anwendungen des 1. Hauptsatzes auf Zustandsänderungen von Gasen

8.1. Energieumwandlungen bei isochoren Zustandsänderungen

Ein Gas wird in einem geschlossenen Gefäß erwärmt, dessen Volumen konstant bleibt. Da sich das Gas nicht ausdehnen kann, verrichtet es keine mechanische Arbeit: $W_m = 0$.
Aus der ersten Formulierung des 1. Hauptsatzes, $\Delta E_i = W_w + W_m$, folgt:

(1)

Energiebilanz bei isochorer Zustandsänderung	$W_w = \Delta E_i$

▶ Bei einer isochoren Zustandsänderung ist die zugeführte (abgegebene) Wärmemenge gleich der Vergrößerung (Verringerung) der inneren Energie des Gases.

(2) $W_w = mc_v \Delta T$

c_v ist die spezifische Wärmekapazität des Gases bei *konstantem Volumen*. Aus (1) und (2) folgt:

(3) $\Delta E_i = mc_v \Delta T$

8.2. Energieumwandlungen bei isobaren Zustandsänderungen

Das Gefäß ist durch einen ideal gedachten, beweglichen Kolben* abgeschlossen (vgl. Abb. 8.1.), so daß der Druck des Gases gleich dem konstanten Außendruck ist. Bei Erwärmung dehnt sich das Gas aus, indem der Kolben gegen den Außendruck nach oben bewegt wird. Das Gewicht des Kolbens wird vernachlässigt. Dann erhält man für die verrichtete mechanische Arbeit nach Abb. 8.1. die Beziehung:

$$W_m = -Fh = -pAh = -p\Delta V$$

A ist der Flächeninhalt der Kolbenfläche.
Also gilt

(4) $W_m = -p(V_2 - V_1)$

Diese mechanische Arbeit kann im p-V-Diagramm durch eine Rechteckfläche dargestellt werden (Abb. 8.2.).

* Ein idealer Kolben hat keine Masse, bewegt sich ohne Reibung und schließt genau ab.

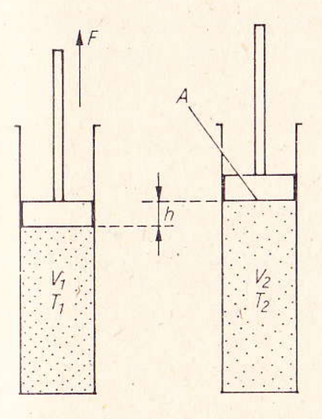


Abb. 8.1. Isobare Zustandsänderung

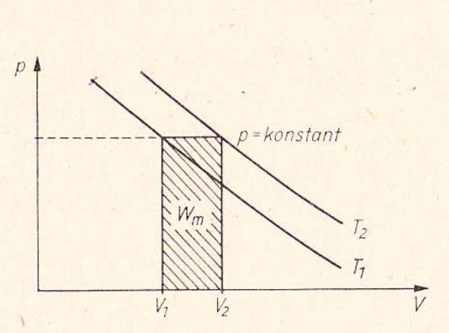


Abb. 8.2. p-V-Diagramm einer isobaren Zustandsänderung

Die Zuführung von Wärme bei konstantem Druck hat i. a. außer der Verrichtung mechanischer Arbeit auch eine Erhöhung der Temperatur zur Folge. Das führt zu einer Vergrößerung der inneren Energie. Für den 1. Hauptsatz erhält man folgende Beziehungen:

$$\Delta E_i = W_w - p\Delta V \quad \text{oder}$$

(5)

Energiebilanz bei isobarer Zustandsänderung	$W_w = \Delta E_i + p\Delta V$

▶ Bei einer isobaren Zustandsänderung ist die zugeführte (abgegebene) Wärmemenge gleich der Summe aus der Vergrößerung (Verringerung) der inneren Energie des Gases und der vom Gas abgegebenen (aufgenommenen) mechanischen Arbeit.

Für die Wärmemenge erhält man jetzt die Beziehung:

$$W_w = mc_p \Delta T$$

Dabei ist c_p die spezifische Wärmekapazität des Gases bei konstantem Druck. Da die innere Energie eines idealen Gases nur von der Temperatur, also nicht vom Druck abhängt, kann man den 1. Hauptsatz in folgender Form schreiben:

$$mc_p \Delta T = mc_v \Delta T + p\Delta V$$

Daraus folgt:

$$c_p - c_v = \frac{p\Delta V}{m\Delta T}$$

Wenn man auf diese Gleichung die allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gas anwendet, erhält man eine interessante Beziehung zwischen c_p und c_v:

(6) $$c_p - c_v = \frac{R_0}{m_{mol}}$$

c_p ist also immer größer als c_v. Der Grund dafür ist, daß das Gas bei einer isobaren Erwärmung mechanische Arbeit verrichtet, bei isochorer Erwärmung aber nicht.

■ **Lehrbeispiel:**

Ein Gas hat die spezifischen Wärmekapazitäten $c_p = 3{,}22 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ und $c_v = 2{,}29 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$. Welche Expansionsarbeit verrichtet 1 kg des Gases, wenn die Temperatur bei konstantem Druck um 1 K steigt?

S₁ gegeben:

$c_p = 3{,}22 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\quad m = 1 \text{ kg}$

$c_v = 2{,}29 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\quad T = 1 \text{ K}$

gesucht:

W_m

S₂ $|W_m| = p\Delta V$ $\quad p\Delta V = m(c_p - c_v)\Delta T$

$c_p - c_v = \frac{R_0}{m_{mol}}$ $\quad p\Delta V = m\frac{R_0}{m_{mol}}\Delta T$

S₃ Allgemeine Lösung:

$$W_m = m(c_p - c_v)\Delta T$$

Spezielle Lösung:

$$W_m = 1 \text{ kg} \cdot 0{,}93 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 1 \text{ K}$$

$$W_m = 9{,}3 \cdot 10^2 \text{ J}$$

Antwort: Das Gas verrichtet eine Expansionsarbeit von 930 J.

S₄ Wegen $c_p - c_v$ = konst. für ein bestimmtes Gas ist die isobare Expansionsarbeit bei konstanter Masse der Temperaturdifferenz und bei konstanter Temperaturdifferenz der Masse direkt proportional.

8.3. Energieumwandlungen bei isothermen Zustandsänderungen

Da jetzt die Temperatur konstant bleibt, und die innere Energie eines idealen Gases nur von der Temperatur abhängt, ändert sich die innere Energie nicht: $\Delta E_i = 0$. Deshalb gilt:

(7)	Energiebilanz bei isothermer Zustandsänderung	$W_m = -W_w$

► Bei einer isothermen Zustandsänderung ist die vom Gas aufgenommene (abgegebene) Wärmemenge gleich der verrichteten Expansionsarbeit (Kompressionsarbeit).

Die bei der isothermen Zustandsänderung verrichtete mechanische Arbeit kann auch als Fläche unter der Kurve $p = p(V)$ dargestellt werden (vgl. Abb. 8.3.). Bei der Berechnung der mechanischen Arbeit muß man beachten, daß der Druck variabel ist. Mit Hilfe der Integralrechnung erhält man folgende Beziehungen:

(8)	Mechanische Arbeit bei isothermer Zustandsänderung	$W_m = -nR_0T\ln\frac{V_2}{V_1}$

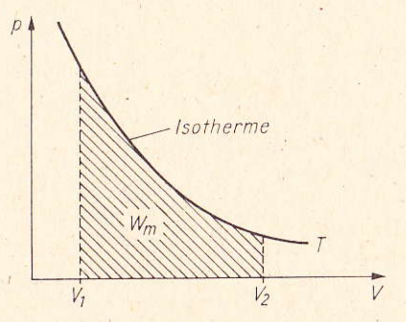


Abb. 8.3. Isotherme Zustandsänderung

Wegen (7) gilt dann:

(9)	1. Hauptsatz bei isothermer Zustandsänderung	$W_w = nR_0T\ln\frac{V_2}{V_1}$

8.4. Energieumwandlungen bei adiabatischen Zustandsänderungen

Eine Zustandsänderung heißt adiabatisch, wenn kein Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt. Diese Bedingung ist bei physikalischen Prozessen erfüllt, die sehr schnell ablaufen, z. B. bei thermischen Prozessen in Verbrennungsmotoren. Bei adiabatischen Zustandsänderungen ist also $W_w = 0$. Der 1. Hauptsatz hat dann die Form:

(10)	1. Hauptsatz bei adiabatischer Zustandsänderung	$\Delta E_i = W_m$

Die bei einer adiabatischen Zustandsänderung verrichtete mechanische Arbeit entsteht aus der inneren Energie des Gases. Umgekehrt führt die adiabatische Aufnahme von mechanischer Energie zu einer äquivalenten Vergrößerung der inneren Energie. Für (10) kann man schreiben:

$$-mc_v \Delta T = p \Delta V$$

Das Minuszeichen ist notwendig, weil zum größeren Volumen die tiefere Temperatur gehört, wenn ein Gas sich adiabatisch entspannt. Aus diesem Grunde haben $\Delta T = T_2 - T_1$ und $\Delta V = V_2 - V_1$ entgegengesetzte Vorzeichen.
Wegen der allgemeinen Zustandsgleichung folgt nun:

$$-mc_v \Delta T = m \frac{R_0}{m_{mol}} T \frac{\Delta V}{V}$$

Nach (6) folgt:

$$-c_v \frac{\Delta T}{T} = (c_p - c_v) \frac{\Delta V}{V}$$

Für sehr kleine Schritte folgt nach Integration:

$$c_v \ln \frac{T_1}{T_2} = (c_p - c_v) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Daraus folgen die Gleichungen:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{c_v} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{c_p - c_v} \quad \text{und} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{c_p}{c_v} - 1}$$

Es ist üblich, für c_p/c_v die Konstante $\varkappa$ (Kappa) zu schreiben. Damit erhält man folgendes Gesetz:

(11)	Temperatur-Volumen-Gesetz für adiabatische Zustandsänderungen	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\varkappa - 1}$ mit $\varkappa = \frac{c_v}{c_p}$

Zwischen dem Druck p und dem Volumen V besteht bei einer adiabatischen Zustandsänderung die Beziehung $pV^{\varkappa}$ = konst. Die graphische Darstellung dieser Gleichung in einem p-V-Diagramm ist eine Adiabate. Sie schneidet die Isothermen, verläuft also steiler als diese. Die mechanische Arbeit entspricht auch in diesem Falle der Fläche unter der Kurve im p-V-Diagramm (vgl. Abb. 8.4.).

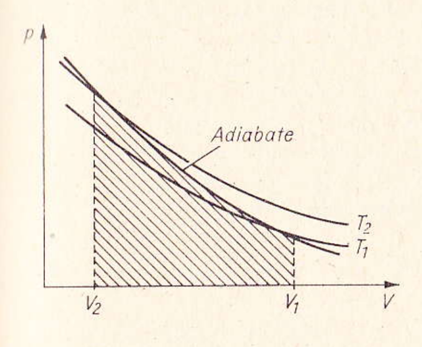


Abb. 8.4. Adiabatische Zustandsänderung

Wortliste zum Text

die Adiabate, -n
 adiabatisch
der Austausch, o.
 beweglich
die Energiebilanz, -en
 expandieren
die Expansion, -en
die Folge, -n
 zur Folge haben
das Gewicht, -e
die Integration
der Kolben, -
die Kompression, o.
 komprimieren A
 realisieren A
 schließen A
 schloß, geschlossen
 steil
der Verbrennungsmotor, -en

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Wirkung hat die isochore Zuführung von Wärmeenergie auf eine Gasmenge?
2) Wie kann man eine isobare Zustandsänderung praktisch realisieren?
3) Welche Energieumwandlung gibt es bei einer isobaren Zustandsänderung?
4) Was bedeuten c_p und c_v, und welche Beziehung besteht zwischen ihnen?
5) Warum führt isotherme Kompressionsarbeit zur Abgabe von Wärmemenge?

6) Was ist eine adiabatische Zustandsänderung?
7) Wo gibt es in der Praxis angenähert adiabatische Prozesse?
8) Welche Energiebilanz gilt für eine adiabatische Zustandsänderung?
9) Worin besteht der Unterschied zwischen einer adiabatischen und einer isothermen Zustandsänderung?

2. Übungen zum Text

2.1. Energieumwandlungen bei Zustandsänderungen

zu/führen; ab/geben; an/nehmen

Ergänzen Sie den Text!

(1) V = konstant; $\Delta E_i = W_w$

Bei einer .... Zustandsänderung ist die .... Wärmemenge gleich der .... der inneren Energie des Gases, oder die .... Wärmemenge ist gleich der Verringerung der inneren Energie.	zuführen abgeben isochor Vergrößerung

(2) T = konstant; $W_m = -W_w$

Bei einer .... Zustandsänderung ist die vom Gas .... Wärmemenge gleich der verrichteten ...., oder die vom Gas abgegebene Wärmemenge ist gleich der verrichteten	aufnehmen isotherm Kompressionsarbeit Expansionsarbeit

(3) p = konstant; $W_w = \Delta E_i + p\Delta V$

Bei einer .... Zustandsänderung ist die .... Wärmemenge gleich der Summe aus der .... der inneren Energie des Gases und der vom Gas .... mechanischen Energie, oder die abgegebene Wärmemenge ist gleich der Summe aus der .... der inneren Energie und der vom Gas .... mechanischen Energie.	zuführen abgeben isobar Vergrößerung aufnehmen Verringerung

2.2. Bedingungen für die Energieumwandlungen

Angabe einer Bedingung

Beantworten Sie die Fragen in der richtigen grammatischen Form!

(1) Unter welcher Bedingung ist die zugeführte Wärmemenge gleich der Vergrößerung der inneren Energie?
(2) Unter welcher Bedingung gilt die Gleichung $W_w = \Delta E_i$?
(3) Unter welcher Bedingung ist die aufgenommene Wärmemenge gleich der verrichteten Expansionsarbeit?
(4) Unter welcher Bedingung ist die abgegebene Wärmemenge gleich der Verringerung der inneren Energie des Gases?
(5) Unter welcher Bedingung ist die zugeführte Wärmemenge gleich der Summe aus der Vergrößerung der inneren Energie des Gases und der abgegebenen mechanischen Energie?
(6) Unter welcher Bedingung gilt die Gleichung

$$W_w = \Delta E_i + p\Delta V?$$

2.3. Zustandsänderungen

Konsekutivsatz

Bilden Sie Konsekutivsätze, indem Sie zwei Sätze verbinden!

► Die Temperatur bleibt konstant, so daß die Änderung der inneren Energie null ist.

(1) Die Temperatur bleibt konstant.
Die Änderung der inneren Energie ist null.
(2) Ein Gas wird in einem geschlossenen Gefäß erwärmt.
Es kann sich nicht ausdehnen.
(3) Das Gas kann sich nicht ausdehnen.
Es kann keine mechanische Arbeit verrichten.
(4) Bei isochoren Zustandsänderungen ist die verrichtete mechanische Arbeit null.
Die zugeführte Wärmemenge ist gleich der Änderung der inneren Energie.
(5) Das Gas ist durch einen beweglichen Kolben abgeschlossen.
Der Druck des Gases ist gleich dem Außendruck.
(6) Bei Erwärmung dehnt sich das Gas aus.
Der Kolben wird gegen den Außendruck nach oben bewegt.

2.4. Definitionen wichtiger Begriffe

2.4.1. *Definieren Sie die folgenden Begriffe!*

Attributsatz

(1) isotherme Zustandsänderung	(5) Isotherme
(2) isobare Zustandsänderung	(6) Adiabate
(3) isochore Zustandsänderung	(7) Expansionsarbeit
(4) adiabatische Zustandsänderung	(8) Kompressionsarbeit

2.4.2. *Definieren Sie die folgenden Begriffe!*

Konditionalsatz

(1) abgeschlossenes System
(2) isotherme Zustandsänderung
(3) isobare Zustandsänderung
(4) isochore Zustandsänderung
(5) adiabatische Zustandsänderung

2.5. Die mathematische Beschreibung der Energieumwandlungen

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $W_w = \Delta E_i$

(2) $W_w = \Delta E_i + p\Delta V$

(3) $W_w = nR_0T\ln\frac{V_2}{V_1}$

(4) $\Delta E_i = W_m$

2.6. Die adiabatische Zustandsänderung

2.6.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Unter welcher Bedingung erfolgt bei einer Zustandsänderung kein Wärmeaustausch mit der Umgebung?
(2) Was versteht man unter einer adiabatischen Zustandsänderung?
(3) Welche Form hat der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für adiabatische Zustandsänderungen?
(4) Warum kann das Gas mechanische Arbeit verrichten?
(5) Wie ändern sich beim Verrichten von mechanischer Arbeit die innere Energie und die Temperatur?
(6) Welche Darstellung erhält man dafür im p-V-Diagramm?
(7) Wodurch unterscheidet sich die Adiabate von der Isotherme?

2.6.2. *Sprechen Sie* über die adiabatische Zustandsänderung! Verwenden Sie dabei die Antworten von 2.6.1.!

3. Übungen zum Thema

3.1. Thermische Prozesse in Verbrennungsmotoren

3.1.1. *Sprechen Sie* über die thermischen Prozesse in einem Verbrennungsmotor! Informieren Sie sich dazu in einem Lehrbuch für Physik!

3.1.2. *Sprechen Sie* über das p-V-Diagramm eines Verbrennungsmotors! Beachten Sie die folgenden Hinweise!

(1) Welche Prozesse sind in dem Diagramm dargestellt?
(2) Welche Bedingungen gelten für die einzelnen Prozesse?

4. Textaufgaben

*44. In einer Gasflasche befinden sich 40 l Sauerstoff (O_2) bei einer Temperatur von 19 °C unter einem Druck von $7{,}85 \cdot 10^6$ Pa. Wie groß werden die Temperatur und der Druck, wenn dem Gas eine Wärmemenge von 83,8 kJ zugeführt wird? (c_v = 654 J/kg K)

45. In einer Stahlflasche befinden sich 20 l Wasserstoffgas (H_2). Welche Wärmemenge nimmt das Gas auf, wenn der Druck von $4{,}905 \cdot 10^6$ Pa auf $5{,}886 \cdot 10^6$ Pa steigt? ($c = 10{,}14 \cdot 10^3$ J kg^{-1} K^{-1})

46. 5 kg Kohlendioxid werden isobar erwärmt. Sie verrichten dabei eine Ausdehnungsarbeit von $4{,}905 \cdot 10^4$ J. Welche Temperatur wird dabei erreicht, wenn die Anfangstemperatur 10 °C betrug?

47. Welche Arbeit verrichten 15 kg Luft, wenn sie bei gleichbleibendem Druck von 20 °C auf 150 °C erwärmt werden? (m_{mol} = 29 g mol^{-1})

*48. Welche Arbeit ist notwendig, um 12 m³ Druckluft von $1{,}18 \cdot 10^6$ Pa herzustellen, wenn der Anfangsdruck $1{,}08 \cdot 10^5$ Pa beträgt?

*49. Welche Arbeit wird zur Verdichtung einer Luftmenge von 20 °C und $9{,}81 \cdot 10^4$ Pa benötigt? Das Druckgefäß hat ein Volumen von 600 l, der Enddruck beträgt $1{,}47 \cdot 10^7$ Pa.

*50. Welche Arbeit verrichten 2,5 m³ Luft von 32 °C und $4{,}41 \cdot 10^5$ Pa, wenn sie sich adiabatisch so weit ausdehnen, daß ihre Temperatur auf 15 °C sinkt? Wie groß sind das Endvolumen und der Enddruck?
(c_v = 719 J/kg K; m_{mol} = 29 g/mol; $\varkappa$ = 1,40)

9. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

9.1. Reversible Zustandsänderungen

Eine Zustandsänderung eines thermodynamischen Systems heißt reversibel, wenn sie zeitlich umkehrbar ist. Das bedeutet, daß der Anfangszustand des Systems wieder erreicht werden kann, ohne daß im System oder in der Umgebung Veränderungen zurückbleiben.
Reversible Prozesse sind ideale Modellprozesse, die in der Praxis nur annähernd erreicht werden können. So sind z. B. die mechanischen Schwingungen eines Pendels reversible Prozesse, wenn die Reibung vernachlässigt wird.
Ein Prozeß heißt irreversibel, wenn er nicht zeitlich umkehrbar ist. Das bedeutet, daß der Anfangszustand nur mit Hilfe äußerer Systeme wieder erreicht werden kann, die dabei verändert werden.

▶ In der Praxis können in thermodynamischen Systemen nur irreversible Prozesse stattfinden.

Alle von selbst ablaufenden Prozesse sind irreversibel.

9.2. Die Notwendigkeit des 2. Hauptsatzes

Der erste Hauptsatz verlangt, daß in einem abgeschlossenen System die Gesamtenergie bei allen Zustandsänderungen konstant bleibt. Die folgenden Beispiele zeigen, daß nach dem ersten Hauptsatz noch Zustandsänderungen möglich sind, die unserer Erfahrung widersprechen.
1. Beispiel: Ein Körper fällt von einer Höhe h herab. Beim Auftreffen auf dem Boden vergrößert sich die innere Energie des Systems ‚Körper und Umgebung' durch Erwärmung. Die Umkehrung des Prozesses, daß sich die innere Energie des Körpers und der Umgebung durch Abkühlung verringert und der Körper dadurch von selbst zur Höhe h zurückkehrt, ist nach dem ersten Hauptsatz möglich, widerspricht aber unserer Erfahrung.
2. Beispiel: Ein Wagen rollt auf einem Tisch. Wegen der Reibung hält er nach einiger Zeit an. Die Lager des Wagens und der Tisch haben sich erwärmt; ihre innere Energie ist also größer geworden. Nach dem ersten Hauptsatz ist es möglich, daß sich der Tisch und die Lager des Wagens von selbst abkühlen und der Wagen dadurch wieder zu rollen beginnt. Ein solcher Vorgang widerspricht aber unserer Erfahrung.

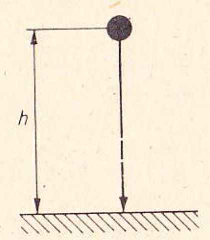
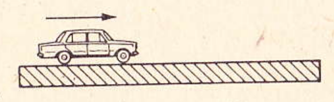


Abb. 9.1. Fallender Körper


Abb. 9.2. Rollender Wagen

Die irreversiblen Prozesse der beiden Beispiele zeigen, daß es notwendig ist, einen zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu formulieren, der Aussagen über die Richtung thermodynamischer Prozesse macht.

9.3. Formulierungen des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik

Wie für den ersten Hauptsatz gibt es auch für den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verschiedene Formulierungen, die sich nicht im Inhalt, sondern nur in der Betrachtungsweise unterscheiden.
Die Physiker *Thomson* und *Planck* fanden folgende Formulierung für den zweiten Hauptsatz:

▶ Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu bauen, die nichts anderes bewirkt, als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmespeichers.

Eine solche Maschine gestattet es nämlich, aus der Wärme, die z. B. in der Luft und im Meerwasser in großen Mengen vorhanden ist, praktisch unbegrenzt mechanische Arbeit zu gewinnen. Man nennt eine solche Maschine deshalb ein Perpetuum mobile zweiter Art. Man kann folglich den zweiten Hauptsatz auch so formulieren:

▶ Es gibt kein Perpetuum mobile zweiter Art.

Eine dritte Formulierung des zweiten Hauptsatzes schuf der Physiker *Clausius*:

▶ Wärme kann niemals ohne äußere Einwirkung von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen.

Wortliste zum Text

an/halten
  hielt an, angehalten
annähernd
auf/treffen auf A
  traf auf, aufgetroffen (sein)
die Aussage, -n
äußere
bewirken A
der Boden, ⸚
die Einwirkung, -en
die Gültigkeit, o.
herab
irreversibel
der Kühlschrank, ⸚e
maximal
niemals
das Pendel, –
die Reibung
reversibel
die Richtung, -en
rollen (sein)
schwingen
  schwang, geschwungen
über/gehen
  ging über, übergegangen (sein)
unbegrenzt
vorhanden
der Wagen, –
der Widerspruch, ⸚e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was ist ein reversibler Prozeß?
2) Wann ist eine Zustandsänderung irreversibel?
3) Was kann man über die praktische Möglichkeit reversibler Prozesse sagen?
4) Welche Beispiele zeigen, daß trotz der Gültigkeit des ersten Hauptsatzes Widersprüche zu unserer Erfahrung entstehen können?
5) Warum ist die Formulierung eines zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik notwendig?

6) Wie formulierten *Thomson* und *Planck* den zweiten Hauptsatz?
7) Was ist ein Perpetuum mobile zweiter Art?
8) Wo sind sehr große Mengen von Wärmeenergie gespeichert?
9) Wie formulierte *Clausius* den zweiten Hauptsatz?
10) Ist die Wirkung eines Kühlschranks ein Widerspruch zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik?

2. Übungen zum Text

2.1. Reversible und irreversible Zustandsänderungen

Angabe einer Folge oder Bedingung

Bilden Sie Konditional- oder Konsekutivsätze, indem Sie je zwei Sätze mit „wenn", „so daß" oder „ohne daß" verbinden!

(1) Bei einem reversiblen Prozeß kann der Anfangszustand wieder erreicht werden.
Im System oder in der Umgebung bleiben Veränderungen zurück.
(2) Eine Zustandsänderung heißt reversibel.
Sie ist zeitlich umkehrbar.
(3) Ein irreversibler Prozeß ist nicht zeitlich umkehrbar.
Der Anfangszustand ist nur durch Veränderung in äußeren Systemen erreichbar.
(4) Reversible Prozesse sind ideale Modellprozesse.
Sie können in der Praxis nur annähernd erreicht werden.
(5) Mechanische Schwingungen sind reversible Prozesse.
Die Reibung wird vernachlässigt.

2.2. Definitionen wichtiger Begriffe

Attribut- oder Konditionalsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe mit Hilfe von Attribut- oder Konditionalsätzen!

(1) reversible Zustandsänderung
(2) idealer Modellprozeß
(3) irreversible Zustandsänderung
(4) Perpetuum mobile 2. Art

2.3. Die Notwendigkeit des 2. Hauptsatzes

2.3.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Was sagt der 1. Hauptsatz der Thermodynamik?
(2) Warum genügt der 1. Hauptsatz allein nicht zur Beschreibung thermischer Prozesse?
(3) Welche Beispiele zeigen, daß der 1. Hauptsatz thermische Prozesse nur ungenügend beschreibt?

2.3.2. *Begründen Sie* die Notwendigkeit des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik! Verwenden Sie dabei auch die Antworten von 2.3.1.!

2.4. Die Formulierungen des 2. Hauptsatzes

Sprechen Sie über die Äquivalenz der Formulierungen des 2. Hauptsatzes!

3. Übungen zum Thema

3.1. Aussagen über thermische Prozesse

Angabe eines Grundes

Eine Aussage kann den Wahrheitswert „wahr" oder „falsch" haben.
Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!

Die Gesamtenergie eines thermodynamischen Systems ist konstant.

► Diese Aussage ist falsch, weil nur die Energie eines abgeschlossenen Systems konstant ist.

(1) Die Gesamtenergie eines thermodynamischen Systems ist konstant.
(2) Für alle thermischen Prozesse gilt der 1. Hauptsatz.
(3) Wärmeenergie kann sich in mechanische Energie umwandeln und umgekehrt. Deshalb ist jede Umwandlung von Energie ein reversibler Prozeß.
(4) Jeder thermische Prozeß ist reversibel.
(5) Für alle thermischen Prozesse gilt der 2. Hauptsatz.

10. Energieversorgung und Carnotscher Kreisprozeß

10.1. Fragen der Energieversorgung

Die menschliche Gesellschaft braucht für ihre Entwicklung in der Produktion und für die Konsumtion immer mehr Energie. Dabei steigt die Bedeutung der Elektroenergie. Während z. B. in der DDR im Jahre 1971 69 Mrd. kWh Elektroenergie benötigt wurden, waren in den Jahren 1976 bis 1980 jährlich durchschnittlich 97,2 Mrd. kWh Elektroenergie notwendig.
Auch andere Energieformen werden in steigendem Maße benötigt. Dabei stehen die notwendigen Energiemengen im allgemeinen nicht direkt in der geeigneten Form zur Verfügung, sondern sie müssen durch Energieumwandlungsprozesse aus anderen Energieformen umgeformt werden. Das ist eine Aufgabe der Energiewirtschaft. Sie muß dafür sorgen, daß die vorhandene Primärenergie in Energieformen umgewandelt wird, die für Produktion und Konsumtion geeignet sind. Entschei-

dende Bedeutung als Primärenergie hat bis heute vor allem die Energie der fossilen Brennstoffe. Aber auch die Nutzung der Hydroenergie und der Kernenergie ist bereits gut entwickelt.
Um die Brennstoffe für die Energieversorgung zu nutzen, müssen sie verbrannt werden. Dabei geben sie Wärmeenergie ab, die zum Teil direkt angewendet wird, zum Teil aber in andere Energieformen umgewandelt werden muß. Auch die Kernenergie wird zunächst in Wärmeenergie umgewandelt. Damit ist die Wärmeenergie die wichtigste Form der Sekundärenergie und sie ist die wichtigste Grundlage für die Bereitstellung aller anderen notwendigen Energieformen.
Neben der direkt genutzten Wärmeenergie für Heizzwecke, aber auch in den Kraftstoffen für die Transportmittel, ist besonders die Elektroenergie von Bedeutung. Sie ist in allen Ländern eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der Volkswirtschaft. Ihre historische Bedeutung hat *Lenin* formuliert in der These „Sozialismus, das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes“. Diese These wurde auf der Grundlage des GOELRO-Planes bereits in den Anfängen der wirtschaftlichen Entwicklung der UdSSR in der Praxis wirksam.
Elektroenergie kann wirtschaftlich noch nicht direkt aus Wärmeenergie gewonnen werden, sondern nur indirekt, indem Wärmeenergie zunächst in mechanische Energie umgewandelt wird. Auch für den Antrieb der Transportmittel mit Hilfe von Kraftstoffen muß chemische Energie durch Verbrennung in Wärmeenergie und weiter in mechanische Energie umgewandelt werden. Für die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie sind Wärmekraftmaschinen notwendig. Neben der Dampfmaschine, die wir noch in den Dampflokomotiven finden, den Flugzeugtriebwerken und den Raketenmotoren sind vor allem die Dampfturbine und die Kolbenmotoren von großtechnischer Bedeutung. Sie sind die wichtigsten Wärmekraftmaschinen.
Alle Wärmekraftmaschinen arbeiten dadurch, daß die Zustandsgrößen eines Arbeitsmittels, das in der Maschine enthalten ist, etwa Luft oder Dampf, periodisch verändert werden. Das bedeutet, daß Druck, Temperatur, Volumen und andere Größen immer wieder den gleichen Wert annehmen. Sonst steigt z. B. die Temperatur immer mehr, bis die Maschine zerstört wird. Die periodische Änderung der Zustandsgrößen wird als Kreisprozeß bezeichnet. Also laufen in allen Wärmekraftmaschinen Kreisprozesse ab.

10.2. Der Carnotsche Kreisprozeß

Dieser von *Carnot* im Jahre 1824 entwickelte reversible Kreisprozeß bildet die theoretische Grundlage für die Berechnung des Wirkungsgrades von Wärmekraftmaschinen. Unter dem thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine versteht man folgenden Quotienten:

(1) | Thermischer Wirkungsgrad | $\eta = \dfrac{W_{w_{zu}} - W_{w_{ab}}}{W_{w_{zu}}}$ |
|---|---|

Dabei ist $W_{w_{zu}}$ der Betrag der zugeführten Wärmemenge. $W_{w_{ab}}$ ist der Betrag der Wärmemenge, die von der Maschine wieder abgegeben wird, die also nicht in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Diese Wärmemenge kann nach dem zweiten Hauptsatz nicht null sein. Der *Carnot*sche Kreisprozeß ist ein Modellprozeß, der in einer idealen Gasmenge zwischen der Maximaltemperatur T_1 und der Minimaltemperatur T_2 abläuft. Er hat vier Takte, die alle reversibel sind (vgl. Abb. 10.1.). Die Takte 2 und 4 sind adiabatische Prozesse, bei denen also kein Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt. Es gilt also $W_{w2} = W_{w4} = 0$.

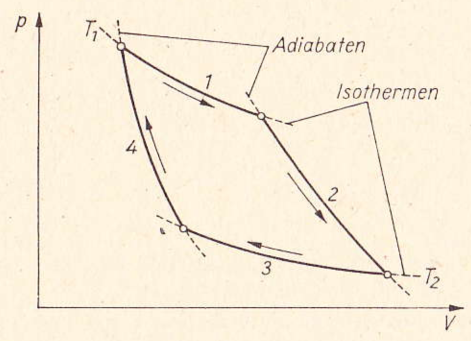


Abb. 10.1. *Carnot*scher Kreisprozeß

Der Takt 1 ist eine isotherme Expansion. Dabei wird dem Gas die Wärmemenge $W_{w1} = nR_0T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$ zugeführt.
Der Takt 3 ist eine isotherme Kompression.
Bei dieser Zustandsänderung gibt das Gas die Wärmemenge

$$W_{w3} = -nR_0T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \quad \text{ab.}$$

Für den thermischen Wirkungsgrad erhält man nach (1):

$$\eta = \frac{W_{w1} - W_{w3}}{W_{w1}} = 1 - \frac{W_{w3}}{W_{w1}} = 1 - \frac{nR_0T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{nR_0T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} \tag{2}$$

Wegen des Temperatur-Volumen-Gesetzes für die adiabatischen Zustandsänderungen gelten die Beziehungen:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\varkappa-1} \quad \text{für den Takt 2 und}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\varkappa-1} \quad \text{für den Takt 4.}$$

Deshalb gilt: $\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$

Wenn man dieses Ergebnis in die Gleichung (2) einsetzt, erhält man:

(3)	Thermischer Wirkungsgrad des *Carnot*schen Kreisprozesses	$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

T_1 ist die Maximaltemperatur, T_2 ist die Minimaltemperatur. Deshalb besteht die Relation

$$0 < \eta < 1$$

Also ist es theoretisch und damit auch praktisch unmöglich, bei Wärmekraftmaschinen einen thermischen Wirkungsgrad von 1 zu erreichen.

Lehrbeispiel:

Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad eines *Carnot*schen Kreisprozesses, der zwischen den Temperaturen 179 °C und 20 °C abläuft?
Unter Beachtung des Zusammenhangs zwischen der *Kelvin*- und der *Celsius*skale erhält man nach (3):

$$\eta = \frac{452 - 293}{452} = \frac{159}{452} = 0{,}35$$

Der Wirkungsgrad dieser Maschine beträgt also 35 %.

Der Wirkungsgrad realer Maschinen liegt unter diesem *Carnot*schen Wirkungsgrad, denn der *Carnot*sche Kreisprozeß hat von allen zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 verlaufenden Kreisprozessen den größten Wirkungsgrad. Diese wichtige Tatsache konnte *Carnot* beweisen.
Die Minimaltemperatur der Gleichung (3) ist i. a. die Temperatur der Außenluft. Der Wirkungsgrad kann also erhöht werden, wenn man die Temperatur T_2 des zugeführten heißen Gases vergrößert. Sie liegt i. a. bei einigen hundert Grad Celsius. Sie ist technisch begrenzt. Deshalb liegt der thermische Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen i. a. weit unter 50 %.
Es ergibt sich also die komplizierte Situation, daß der für die Wirtschaft wichtigste Energieumwandlungsprozeß mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad abläuft. Deshalb suchen Wissenschaftler und Ingenieure intensiv nach Umwandlungsprozessen mit höherem Wirkungsgrad.

Wortliste zum Text

an/treiben A
  trieb an, angetrieben
an/wenden A
benötigen A
bereit/stellen A
beweisen A
  bewies, bewiesen
der Brennstoff, –e
die Dampfmaschine, –n
die Elektrifizierung, o.
die Elektroenergie, o.
fossil
geeignet
die Grundlage, –n
heizen A
die Hydroenergie, o.
die Kernenergie, o.
die Kilowattstunde, –n (Einheit)
der Kolbenmotor, –en
die Konsumtion, o.
der Kraftstoff, –e
der Kreisprozeß, Kreisprozesse
die Lokomotive, –n
die Milliarde, –n
minimal
der Motor, –en
primär
pro
die Rakete, –n
sekundär
die Situation, –en
die Sowjetmacht, o.
der Takt, –e
die These, –n
das Transportmittel, –
das Triebwerk, –e
die Turbine, –n
verbrennen A
  verbrannte, verbrannt
wirksam
der Wirkungsgrad, –e
der Zweck, –e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum sind Energieumwandlungsprozesse notwendig?
2) Welche Formen der Primärenergie werden genutzt?
3) Welche Bedeutung hat die Wärmeenergie?
4) Was sagte *Lenin* über die Bedeutung der Elektrifizierung?
5) Welche Aufgaben haben Wärmekraftmaschinen?
6) Warum müssen in Wärmekraftmaschinen Kreisprozesse ablaufen?
7) Wie ist der thermische Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine definiert?
8) Welche Takte hat ein *Carnot*scher Kreisprozeß?
9) Warum braucht man die Takte 2 und 4 bei der Berechnung des Wirkungsgrades des *Carnot*prozesses nicht zu berücksichtigen?
10) Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Wirkungsgrad des *Carnot*schen Kreisprozesses und dem Wirkungsgrad einer realen Wärmekraftmaschine?

2. Übungen zum Text

2.1. Energieformen und ihre Umwandlung

2.1.1. *Nennen Sie* wichtige Formen der Primär- und Sekundärenergie!

2.1.2. *Beantworten Sie* die folgenden Fragen!

(1) Wozu braucht man Energie?
(2) Wie gewinnt man aus fossilen Brennstoffen Wärmeenergie?
(3) Warum ist die Elektroenergie von besonderer Bedeutung?
(4) Wozu verwendet man Wärmeenergie?
(5) Wozu verwendet man Hydroenergie?
(6) Wie erzeugt man Elektroenergie aus Kernenergie?

2.1.3. *Ergänzen Sie den Text!* zusammengesetzte Substantive

Wärmeenergie und Elektroenergie sind wichtige .... Für jedes Land hat die .... eine große Bedeutung. Die Sekundärenergie erhält man aus der Primärenergie durch .... Die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie erfolgt in .... Ein Beispiel für eine Wärmekraftmaschine ist der ....

Energiewirtschaft
Kolbenmotor
Energieformen
Wärmekraftmaschinen
Energieumwandlung

2.2. Der thermische Wirkungsgrad

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $\eta = \frac{W_{W_{zu}} - W_{W_{ab}}}{W_{W_{zu}}}$ (2) $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

3. Übungen zum Thema

3.1. Wärmekraftmaschinen

3.1.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Welche Wärmekraftmaschinen kennen Sie?
(2) Welche Energieumwandlungen finden in Wärmekraftmaschinen statt?
(3) Was wissen Sie über den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen?

3.1.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!* eine Arbeit verrichten

Antworten Sie in vollständigen Sätzen!
Mehrere Antworten sind möglich.

(1) Was kann eine Arbeit verrichten?
(2) Wobei wird eine Arbeit verrichtet?

Dampfmaschine
Kolbenmotor
Gas
Kompression
Lokomotive
Expansion
Motor

3.2. Die Darstellung des Carnotschen Kreisprozesses im *p-V*-Diagramm

Sprechen Sie über das Diagramm in Abb. 10.1., indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Welcher Zusammenhang wird im Diagramm dargestellt?
(2) Welche Gleichungen sind die Grundlage für das Diagramm?
(3) Welchen physikalischen Sachverhalt stellt das Diagramm dar und unter welchen Bedingungen gilt es?

3.3. Die Arbeit eines Viertakt-Dieselmotors

Informieren Sie sich in einem Lehrbuch für Physik über die Darstellung der Arbeitsweise eines Viertakt-*Diesel*motors in einem *p-V*-Diagramm! *Erklären Sie an diesem Diagramm die 4 Takte*, indem Sie von den theoretischen Kenntnissen über Zustandsänderungen ausgehen!

3.4. Die Bedeutung der Energiewirtschaft

Sprechen Sie über die Energiewirtschaft in Ihrem Land! Beachten Sie dabei die folgenden Hinweise!

(1) Welche Energieformen spielen eine große Rolle?
(2) Wodurch wird der Energiebedarf bestimmt?
(3) Wie wird sich in Zukunft die Energiewirtschaft entwickeln?

3.5. Energieumwandlungen

Sprechen Sie über die folgenden Energieumwandlungen!

(1) Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie
(2) Umwandlung von Wärmeenergie in Elektroenergie
(3) Umwandlung von Elektroenergie in mechanische Energie

4. Textaufgaben

51. In einem Motor erfolgt die Wärmezufuhr bei einer Temperatur von 1800 °C. Die Abgase verlassen den Kreisprozeß mit einer Temperatur von 927 °C. Wie groß ist der Wirkungsgrad, wenn ein *Carnot*-Prozeß angenommen wird?

52. Bei einer Dampfmaschine wird der Dampf mit einer Temperatur von 227 °C zugeführt. Die Abgastemperatur beträgt 100 °C. Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad, wenn ein *Carnot*-Prozeß angenommen wird?

11. Grundbegriffe der kinetischen Gastheorie

11.1. Verschiedene Betrachtungsweisen der objektiven Realität

Die Aussagen über die Temperatur und über das thermische Verhalten der Körper bezogen sich bisher auf Körper als Ganzes, z. B. auf eine Gasmenge. Mit Hilfe der Zustandsgrößen und Materialkonstanten wurden verschiedene Gesetzmäßigkeiten der Körper mathematisch beschrieben. Eine solche Betrachtung und Beschreibung der Natur ist makrophysikalisch. Man kann aber das thermische Verhalten der Körper auch durch die Bewegung und die Eigenschaften seiner Teilchen, die z. B. Moleküle und Atome sind, erklären. Diese Betrachtung der Natur ist mikrophysikalisch. Die kinetische Gastheorie betrachtet die Natur mikrophysikalisch.

11.2. Die molekulare Struktur der Gase

Die Moleküle eines Gases sind relativ frei beweglich, so daß eine Gasmenge keine feste Form und ein beliebig großes Volumen hat. Die folgenden zwei Beispiele zeigen, daß sich die Teilchen von Gasen in ständiger thermischer Bewegung befinden.

11.2.1. Die Brownsche Bewegung

In einen gut beleuchteten Glaszylinder bringt man etwas Rauch. Wenn man die Rauchteilchen mit einem Mikroskop betrachtet, so stellt man fest, daß sie sich unregelmäßig bewegen. Die Ursache dieser unregelmäßigen Bewegung sind Stöße der Luftmoleküle, die sich in ständiger thermischer Bewegung befinden, gegen die Rauchteilchen (vgl. Abb. 11.1.). Diese Bewegung wurde zuerst 1827 von dem Biologen *Brown* beobachtet. Durch diese *Brown*sche Bewegung erhält man ein Bild der Molekülbewegung.

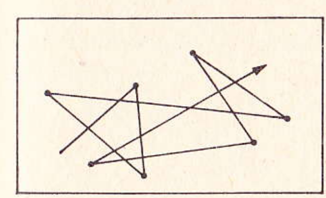


Abb. 11.1. *Brown*sche Bewegung

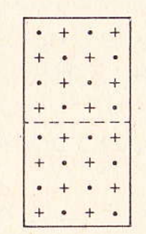


Abb. 11.2. Zur Diffusion

11.2.2. Die Diffusion

Wenn sich in einem Raum zwei getrennte Gase befinden, so stellt man nach kurzer Zeit fest, daß sie sich selbständig gemischt haben. Es hat ein Teilchentransport stattgefunden, den man als Diffusion bezeichnet. Die Diffusion zeigt, daß sich die Moleküle der Gase in ständiger Bewegung befinden. Die Diffusion ist beendet, wenn sich eine homogene Gasmischung gebildet hat. Die Diffusion spielt z. B. beim Stoffwechsel im Körper des Menschen eine große Rolle.
Diffusionsvorgänge kann man auch bei flüssigen und sogar bei festen Körpern nachweisen. (Vgl. Abb. 11.2.)

11.2.3. Der molekulare Aufbau der Gase

Die *Brown*sche Bewegung und die Diffusion ermöglichen es, Aussagen über den molekularen Aufbau der Gase zu formulieren. Die Moleküle eines Gases sind relativ frei beweglich. Sie befinden sich in einer ständigen, ungeordneten Bewegung. Der mittlere Abstand zwischen den Molekülen eines Gases ist so groß, daß man die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen i. a. vernachlässigen kann.
Die Moleküle stoßen wegen ihrer thermischen Bewegung ständig zusammen und gegen die Wand des Gefäßes. Bei einem Zusammenstoß ändern sich i. a. Betrag und Richtung der Geschwindigkeit der Moleküle.

11.3. Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

11.3.1. Zur Herleitung der Grundgleichung

Die Zahl der Teilchen in einem Gas ist sehr hoch. So sind z. B. in einem Mol eines Gases $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen enthalten. Man muß deshalb in der kinetischen Gastheorie von vereinfachenden Modellaussagen über die Teilchen ausgehen und die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Praxis vergleichen.

Die kinetische Gastheorie erklärt den Gasdruck als die Folge elastischer Stöße der Moleküle des Gases auf die Wand des Gefäßes.
Bei der Herleitung der Grundgleichung geht man von folgendem Modell aus:

(1) Die Gasmoleküle sind Punktmassen.
(2) Zwischen den Molekülen wirken keine Kräfte.
(3) Die Moleküle bewegen sich ungeordnet.

Die mathematische Behandlung dieses Modells führt zur Grundgleichung:

(1)	Grundgleichung der kinetischen Gastheorie	$p = \frac{N}{3} \frac{m_x v^2}{V}$

In dieser Gleichung sind: p der Gasdruck; V das Volumen des Gases; N ist die Anzahl der Moleküle im Volumen V; m_x ist die Masse eines Moleküls; $v^2 = \frac{1}{n}(v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_n^2)$ ist die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Moleküle.

11.3.2. Einige Folgerungen aus der Grundgleichung

Die Folgerungen aus der Grundgleichung, besonders die Ergebnisse ihres Vergleichs mit makroskopischen Aussagen, zeigen, daß die Grundgleichung die Realität richtig beschreibt.

a) Vergleich der Grundgleichung mit dem Gesetz von *Boyle*
Aus dem *Boyle*schen Gesetz folgt, daß das Produkt aus dem Druck und dem Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge konstant ist, wenn die Temperatur konstant ist. Eine Betrachtung der Grundgleichung in der Form

(2) $$p \cdot V = \frac{N \cdot m_x}{3} v^2$$

zeigt, daß das betrachtete Produkt konstant ist, wenn v^2 konstant ist. Die Voraussetzung einer konstanten Temperatur bei der makroskopischen Betrachtungsweise entspricht bei der mikroskopischen Betrachtungsweise der Bedingung, daß die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Moleküle konstant sein muß.

b) Vergleich der Grundgleichung mit der Zustandsgleichung für ideale Gase
Entsprechend der allgemeinen Zustandsgleichung gilt:

$$p \cdot V = \frac{m \cdot R_0}{m_{mol}} T$$

Zusammen mit (2) folgt:

(3) $$\frac{N m_x v^2}{3} = \frac{m R_0 T}{m_{mol}}$$

und daraus:

(4) $$\frac{m_x v^2}{2} = \frac{3 m R_0}{2 N m_{mol}} \cdot T$$

Da der Bruch auf der rechten Seite für eine abgeschlossene Gasmenge konstant ist, folgt:

$$\frac{m_x v^2}{2} \sim T$$

▶ Die mittlere kinetische Energie der Moleküle eines idealen Gases ist der absoluten Temperatur direkt proportional.

Diese Aussage ist sehr wichtig für das Verständnis des Temperaturbegriffs.

c) Mittlere quadratische Geschwindigkeit der Moleküle
Wenn man beachtet, daß das Produkt $N \cdot m_x$ gleich der Masse m des Gases ist, folgt aus (3) diese Beziehung:

(5)	Mittlere quadratische Geschwindigkeit	$v^2 = 3 \frac{R_0}{m_{mol}} T$

Man sieht, daß die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Moleküle der absoluten Temperatur direkt proportional ist.

■ **Lehrbeispiel:**

Wie groß ist die Wurzel aus der mittleren quadratischen Geschwindigkeit der Moleküle von Sauerstoff (O_2) bei einer Temperatur von 18 °C?

S_1 gegeben:

$\vartheta = 18\ °C$, $T = 291\ K$

$m_{mol} = 32\ g/mol$

$R_0 = 8{,}314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$

gesucht:

$\sqrt{v^2}$

S_3 allgemeine Lösung:

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3 R_0 T}{m_{mol}}}$$

spezielle Lösung:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3\cdot 8{,}314\ \mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}}\ 291\ \mathrm{K}}{32\ \mathrm{g\,mol^{-1}}}} = \sqrt{\frac{3\cdot 8{,}314\cdot 10^3\ \mathrm{g\,m^2\,s^{-2}}\cdot 291}{32\ \mathrm{g}}}$$

$$= \sqrt{22{,}7\cdot 10^4\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}}$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} = 476\ \mathrm{m\,s^{-1}}$$

Die Wurzel aus der mittleren quadratischen Geschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle beträgt bei 18 °C 476 m s^{-1}.
Diese Geschwindigkeit ist größer als die Schallgeschwindigkeit in Luft.

---

d) Die innere Energie eines idealen Gases
Für ideale Gase ist die innere Energie gleich der Summe aus den kinetischen Energien der Teilchen.

$$E_i = \sum E_{kin} = N\frac{m_x v^2}{2}$$

Daraus folgt unter Beachtung von (4):

(6)	Innere Energie des idealen Gases	$E_i = \frac{3}{2}\frac{mR_0}{m_{mol}}T$

Die innere Energie eines idealen Gases ist der absoluten Temperatur direkt proportional. Sie ist vom Volumen unabhängig. Eine Verringerung des Volumens z. B. führt bei konstanter Temperatur zur Erhöhung der Anzahl der Stöße pro Zeiteinheit auf die Gefäßwand. Das bedeutet eine Druckerhöhung. Da aber die Stöße als völlig elastisch angenommen werden, ändert sich an der kinetischen Energie der Teilchen und damit an der inneren Energie des idealen Gases nichts. Die Gleichung (6) gilt mit guter Näherung für einatomige Gase. Bei mehratomigen Gasen treten schwierigere Zusammenhänge auf.

Wortliste zum Text

an/nehmen A
  nahm an, angenommen
aus/gehen von D
  ging aus, ausgegangen
beleuchten A
diffundieren in A
die Diffusion, o.
  elastisch
  entsprechen D
    entsprach, entsprochen
  ermöglichen A
  experimentell

  homogen
  makrophysikalisch
  mikrophysikalisch
das Mikroskop, -e
  molekular
  nachweisbar
der Rauch, o.
der Sauerstoff, o.
der Schall, o.
der Stoffwechsel
der Stoß, ⸗e
  trennen A
  überein/stimmen mit D
  vereinfachen A
das Verständnis, o.
die Wand, ⸗e
die Wurzel, -n (math.)
  zusammen/stoßen
    stieß zusammen, zusammengestoßen (sein)

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Betrachtungsweisen der objektiven Realität kann man unterscheiden, und wodurch sind diese charakterisiert?
2) Welche Vorgänge zeigen, daß sich die Teilchen der Stoffe bewegen?
3) Was beobachtet man bei der *Brown*schen Bewegung?
4) Was ist Diffusion?
5) Was kann man über die molekulare Struktur eines Gases sagen?
6) Was bedeuten die Größen in der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie?
7) Was folgt aus dem Vergleich der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie mit der allgemeinen Zustandsgleichung für das ideale Gas?
8) Wovon hängt die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Moleküle eines Gases ab?
9) Womit beschäftigt sich die kinetische Gastheorie?

2. Übungen zum Text

2.1. Betrachtungsweisen der objektiven Realität

sich beziehen auf A

Beantworten Sie die Fragen! Verwenden Sie in den Antworten das Verb „sich beziehen auf"!

(1) Worauf beziehen sich Aussagen über die Temperatur?
(2) Auf welche Zustandsgrößen bezieht man sich bei der makrophysikalischen Betrachtung eines Gases?
(3) Worauf bezieht man sich bei der mikrophysikalischen Erklärung des Druckes?
(4) Worauf bezieht man sich bei der mikrophysikalischen Beschreibung des thermischen Verhaltens eines Gases?

2.2. Die molekulare Struktur der Gase

Konsekutivsatz

Bilden Sie Konsekutivsätze, indem Sie jeweils zwei Sätze mit „so daß“ verbinden!

(1) Die Moleküle bewegen sich ständig.
Sie verteilen sich gleichmäßig über den ganzen Raum.
(2) Die Moleküle bewegen sich unregelmäßig im Raum.
Sie stoßen zusammen.
(3) Die Moleküle stoßen zusammen.
Ihre Bewegungsrichtung ändert sich.
(4) Die Moleküle stoßen zusammen.
Ihre Geschwindigkeit ändert sich.
(5) Der mittlere Abstand zwischen den Molekülen ist relativ groß.
Man kann die Kohäsionskräfte vernachlässigen.
(6) Die Geschwindigkeit der Moleküle ist unterschiedlich.
Man muß mit einer mittleren Geschwindigkeit rechnen.

2.3. Brownsche Bewegung und Diffusion

2.3.1. *Ergänzen Sie den Text!*

In ein Gas bringt man kleine Körper, die man mit einem .... beobachten kann. Sie bewegen sich .... Diese Bewegung nennt man .... Ihre Ursache ist die .... Bewegung der Moleküle. Die Moleküle .... mit den Körpern .... Auch die .... beweist, daß sich die Moleküle in ständiger Bewegung befinden. Wenn sich in einem Raum zwei .... Gase befinden, so entsteht nach einiger Zeit eine .... Gasmischung.

- *Brown*sche Bewegung
- zusammenstoßen
- unregelmäßig
- Mikroskop
- thermisch
- trennen
- homogen
- Diffusion

2.3.2. *Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!*

Angabe eines Mittels, eines Grundes und einer Bedingung

(1) Wie kann man die Bewegung sehr kleiner Körper in einem Gas feststellen?
(2) Warum bewegen sich die kleinen Körper im Gas?
(3) Wodurch erhält man ein Bild der Molekülbewegung?
(4) Unter welcher Bedingung findet Diffusion statt?
(5) Warum findet zwischen zwei Gasen Diffusion statt?

2.3.3. *Sprechen Sie* über die *Brown*sche Bewegung und die Diffusion! Verwenden Sie auch die Antworten von 2.3.2.!

2.4. Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

2.4.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

aus/gehen von D

Verwenden Sie in den Antworten das Verb „ausgehen von“!

(1) Wovon geht man bei der Erklärung des Gasdruckes aus?
(2) Wovon geht man bei der Herleitung der Grundgleichung aus?
(3) Wovon geht man bei der Berechnung der mittleren quadratischen Geschwindigkeit aus?
(4) Wovon geht man in der kinetischen Gastheorie aus?

- Grundgleichung der kinetischen Gastheorie
- Stöße der Moleküle auf die Wand
- Modellaussagen über das Verhalten der Moleküle

2.4.2. *Interpretieren Sie* die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie! (Vgl. S. 29)

2.5. Folgerungen aus der Grundgleichung

2.5.1. *Vergleichen Sie* die folgenden Gleichungen in bezug auf den dargestellten physikalischen Sachverhalt und die dazu verwendeten physikalischen Größen! Was folgt aus dem Vergleich?

$$p \cdot V = nR_0T \quad \text{mit} \quad T = \text{konst.} \qquad p \cdot V = \frac{Nm_x}{3} \cdot v^2 \quad \text{mit} \quad v = \text{konst.}$$

2.5.2. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $v^2 = 3\,\frac{R_0}{m_{mol}}\,T$ (2) $E_i = \frac{3}{2}\,\frac{mR_0}{m_{mol}}\,T$

2.5.3. *Beantworten Sie die Fragen!*

Proportionalsatz

Verwenden Sie Proportionalsätze!

(1) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der mittleren kinetischen Energie der Moleküle und der absoluten Temperatur?
(2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der mittleren quadratischen Geschwindigkeit der Moleküle und der absoluten Temperatur?
(3) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der inneren Energie eines Gases und der absoluten Temperatur?

2.6. Die makro- und die mikrophysikalische Betrachtungsweise

Vergleichen Sie die beiden Betrachtungsweisen der objektiven Realität in bezug auf
(1) ihre Aufgabe, (2) die verwendeten physikalischen Größen und (3) die Gleichungen!
Vervollständigen Sie dazu die Tabelle!

	makrophysikalische Betrachtungsweise	mikrophysikalische Betrachtungsweise
1. Ziel/ Aufgabe		
2. physikalische Größen		
3. Gleichungen für den Term $p \cdot V$		

3. Übungen zum Thema

3.1. Die Diffusion

3.1.1. *Beschreiben Sie* ein Experiment zum Nachweis der Diffusion! Beachten Sie folgende Hinweise: Ziel des Experimentes, Geräte, Durchführung des Experimentes (Beobachtung), Ergebnis!

3.1.2. *Sprechen Sie* über die Anwendung der Diffusion in der Technik!
Nennen Sie dazu zwei Beispiele aus der Technik, und *erläutern Sie* ein Beispiel genauer!

3.2. Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

Informieren Sie sich in einem Lehrbuch der Physik über die Herleitung der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie, und *nennen Sie* die wichtigsten Voraussetzungen und Annahmen, die man für die Herleitung benutzt!


Universitäts- und Landesbibliothek Halle Zweigbibliothek Fremdsprachen

4. Textaufgaben

53. Wieviel Teilchen enthält 1 cm^3 eines idealen Gases bei der Temperatur 15 °C und dem Druck $1{,}33 \cdot 10^{-6}$ Pa?

54. Welche innere Energie haben 5 cm^3 eines idealen Gases bei einem Druck von $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa?

55. Wie groß ist die Wurzel aus der mittleren quadratischen Geschwindigkeit der Moleküle von Sauerstoff (O_2), Wasserstoff (H_2) und Ioddampf (I_2) bei 20 °C?

***56.** Wie groß ist die Energie eines Teilchens im Zentrum der Sonne, wenn eine Temperatur von $2 \cdot 10^7$ K angenommen wird? Welcher Druck herrscht dort, wenn in jedem cm^3 $5 \cdot 10^{23}$ Teilchen angenommen werden?

Zusammenfassende Übungen zur Wärmelehre

Zur Grammatik

1. Angabe eines Zweckes

1.1. Zusammenstellung der Grammatik

Die Frage nach dem Zweck (Ziel) ist: **„Wozu?“**
„Zu welchem Zweck?“

► Wozu braucht man ein Thermometer?
► Zu welchem Zweck braucht man ein Thermometer?

Die Antwort auf diese Frage kann erfolgen
(1) durch einen Finalsatz mit **„damit“**
► Man braucht ein Thermometer, damit man die Temperatur messen kann.

(2) durch eine Infinitivkonstruktion mit **„um ... zu“**
► Man braucht ein Thermometer, um die Temperatur zu messen.

(3) durch eine präpositionale Wortgruppe mit der Präposition **„zu“**
► Zum Messen der Temperatur.

1.2. Übung

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form! Verwenden Sie alle Möglichkeiten der Angabe eines Zweckes!

(1) Wozu braucht man physikalische Größen?
(2) Wozu experimentiert man in der Physik?
(3) Wozu verwendet man Modelle?
(4) Wozu braucht man die Größe Temperatur?
(5) Wozu verwendet man die Gleichung

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}?$$

(6) Wozu verwendet man p-V-Diagramme?
(7) Wozu hat ein Bügeleisen einen Bimetallstreifen?
(8) Wozu braucht man Wärmekraftmaschinen?

Wärme in mechanische Energie umwandeln
Temperatur konstanthalten
physikalische Sachverhalte beschreiben
thermische Prozesse untersuchen
objektive Realität möglichst einfach beschreiben
Hypothesen bestätigen
Zustandsänderungen darstellen
thermische Prozesse grafisch darstellen

2. Angabe eines Mittels

2.1. Zusammenstellung der Grammatik

Die Frage nach dem Mittel ist: **„Wodurch?“**
„Wie?“

► Wodurch (wie) erhöht man die Temperatur eines Körpers?

Die Antwort auf diese Frage kann erfolgen
(1) durch einen Instrumentalsatz mit **„indem“** oder **„dadurch, daß“**
► Man erhöht die Temperatur, indem man den Körper erwärmt.
► Man erhöht die Temperatur dadurch, daß man den Körper erwärmt.

(2) durch eine präpositionale Wortgruppe mit der Präposition **„durch“**
► Durch Erwärmung.

2.2. Übung

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form! Verwenden Sie alle genannten Möglichkeiten der Angabe eines Mittels!

(1) Wodurch kann man physikalische Prozesse beschreiben?
(2) Wie kann man physikalische Gesetze bestätigen?
(3) Wie kann man die innere Energie eines Körpers vergrößern?
(4) Wie kann man den Druck einer abgeschlossenen Gasmenge verringern?
(5) Wodurch kann man den Aggregatzustand eines Körpers ändern?

Wärmemenge zuführen
Wärmemenge entziehen
Experimente durchführen
Gleichungen angeben

3. Attributsatz

3.1. Zusammenstellung der Grammatik

Der Attributsatz ist ein Nebensatz zur Angabe eines Attributes.
Er kann eingeleitet werden:
(1) durch ein **Relativpronomen**
► Ein Thermometer ist ein Meßgerät, das man zum Messen der Temperatur verwendet.

(2) durch eine **Präposition und** ein **Relativpronomen**
► Eine isotherme Zustandsänderung ist ein Vorgang, bei dem sich Druck und Volumen ändern und die Temperatur konstant bleibt.

(3) durch eine **Konjunktion** oder ein **Fragewort**
► Es ergibt sich die Frage, ob jede Wärmezufuhr die Erhöhung der Temperatur eines Körpers zur Folge hat.

- Die Frage, wie sich bei Zustandsänderungen die Energien ändern, kann mit Hilfe des 1. Hauptsatzes beantwortet werden.
- Auf die Frage, welche Schmelztemperatur Kupfer hat, gibt eine Tabelle Antwort.

3.2. Übungen

3.2.1. *Ergänzen Sie den Text durch Relativpronomen oder Präpositionen mit Relativpronomen!*

Die Temperatur ist eine physikalische Größe, ... man thermische Zustände charakterisieren kann. Die Energie ist eine physikalische Größe, ... Einheit das Joule ist. Die spezifische Wärmekapazität ist eine Stoffkonstante, ... von der Temperatur abhängt. Zustandsänderungen sind Prozesse, ... sich die Zustandsgrößen ändern. Die Volumenänderung ist eine Erscheinung, ... man bei Erwärmung oder Abkühlung beobachten kann. Die Wärmeübertragung ist ein Prozeß, ... thermischen Kontakt voraussetzt.

3.2.2. *Bilden Sie Attributsätze nach dem folgenden Beispiel! Bestimmen Sie gleichzeitig den Wahrheitswert des Attributsatzes!*

- Die Behauptung, daß jede Wärmezufuhr die innere Energie eines Gases vergrößert, ist falsch.

(1) Jede Wärmezufuhr vergrößert die innere Energie eines Gases.
(2) Jede Temperaturerhöhung hat eine Volumenvergrößerung zur Folge.
(3) Es kann kein Perpetuum mobile geben.
(4) Der Wirkungsgrad einer Maschine kann gleich 1 sein.
(5) In der Praxis gibt es keine reversiblen Vorgänge.
(6) Die Diffusion ist ein irreversibler Vorgang.
(7) Der 1. Hauptsatz macht eine Aussage über die Richtung bei Energieumwandlungen.
(8) Die kinetische Gastheorie bezieht sich auf die mechanischen Eigenschaften der Teilchen.

3.2.3. *Bilden Sie Attributsätze! Beachten Sie das Beispiel!*

- Über die Frage, wie man die Temperatur messen kann, wurde diskutiert (nicht diskutiert).

(1) Wie kann man die Temperatur messen?
(2) Wovon hängt die Längenänderung eines Körpers ab?
(3) Wie ändert sich bei Erwärmung die Dichte des Wassers?
(4) Von welchen Faktoren hängt die Wärmemenge ab?
(5) Mit welcher Gleichung beschreibt man die Wärmeübertragung?
(6) Wie kann man den Zustand eines Gases ändern?
(7) Welche Energieumwandlungen gibt es bei thermischen Prozessen?

4. Proportionalsatz

4.1. Zusammenstellung der Grammatik

Der Proportionalsatz ist ein Nebensatz zur Angabe eines Zusammenhangs.
Eine Frage nach dem Proportionalsatz ist: **„In welchem Zusammenhang steht/stehen ...?“**

- In welchem Zusammenhang stehen Temperatur und Geschwindigkeit der Teilchen?

Der Proportionalsatz wird mit **„je“** eingeleitet.
Im Hauptsatz steht **„um so“** oder **„desto“**.

- Je größer die Geschwindigkeit der Teilchen ist, um so (desto) höher ist die Temperatur.

4.2. Übung

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!

(1) In welchem Zusammenhang stehen Wärmemenge und Temperaturänderung?
(2) In welchem Zusammenhang stehen bei der Wärmeübertragung aufgenommene und abgegebene Wärmemenge?
(3) In welchem Zusammenhang stehen Volumenänderung und Anfangsvolumen bei konstanter Temperaturänderung?
(4) In welchem Zusammenhang stehen bei einem Gas Druck und Volumen bei konstanter Temperatur?
(5) In welchem Zusammenhang stehen Temperatur und innere Energie eines Körpers?
(6) In welchem Zusammenhang stehen mittlere kinetische Energie der Teilchen und Temperatur?

5. Konsekutivsatz

5.1. Zusammenstellung der Grammatik

Der Konsekutivsatz ist ein Nebensatz. Er drückt eine **Folge** oder eine **erwartete, aber nicht eingetretene Folge** aus. Er wird eingeleitet

(1) durch **„so daß“**
- Ein Körper wird erwärmt, so daß sich sein Volumen vergrößert.

(2) durch **„ohne daß“**, wenn die erwartete Folge nicht eintritt
- Die Temperatur eines Gases erhöht sich, ohne daß sich das Volumen vergrößert.

(3) durch **„daß“**, wenn im entsprechenden Hauptsatz **„so“** steht
- Ein Körper wird so erwärmt, daß er schmilzt.

5.2. Übung

Bilden Sie Konsekutivsätze, indem Sie jeweils zwei Sätze verbinden!

(1) Ein Körper wird erwärmt.
Er verdampft.
(2) Einem Gas wird Wärme entzogen.
Es kondensiert.
(3) Zwei Körper haben thermischen Kontakt.
Es erfolgt eine Wärmeübertragung.
(4) Einem Körper wird Wärme zugeführt.
Die Temperatur ändert sich nicht.
(5) Ein Körper nimmt eine bestimmte Wärmemenge auf.
Die innere Energie vergrößert sich.

Zu Wortschatz und Wortbildung

1. Begriff und Oberbegriff

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach
(1) physikalischen Größen, (2) Einheiten, (3) Geräten, (4) Prozessen, (5) Modellen und (6) Darstellungen von Zusammenhängen!

Temperatur, Kompression, Punktmasse, Joule, Diagramm, Diffusion, Masse, Thermometer, Kelvin, Expansion, Pascal, Dichte, ideales Gas, Tabelle, Wärmeübertragung, Druck, Kondensieren, Kalorimeter, Gleichung, Kilogramm, Energie, Volumenausdehnung

2. Bilden von Begriffen

Ordnen Sie den Substantiven entsprechende Adjektive zu, und *sagen Sie*, was man unter dem Begriff versteht bzw. wozu man ihn braucht!

► grafische Darstellung
► Die grafische Darstellung ist eine Möglichkeit zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge.

Substantive: Energie, Gas, Zustand, Punkt, Masse, Darstellung, Zustandsänderung, Ausdehnungskoeffizient, Nullpunkt

Adjektive: ideal, kritisch, grafisch, absolut, isobar, molar, thermisch, kubisch, kinetisch

3. Verben in antonymischer Bedeutung

3.1. beachten; vernachlässigen

Beantworten Sie die Fragen! Verwenden Sie dabei die Verben „beachten" und „vernachlässigen"!

(1) Welche physikalischen Größen muß man bei der Wärmeausdehnung beachten?
(2) Was muß man bei der Ausdehnung der Flüssigkeiten beachten?
(3) Unter welcher Bedingung kann man bei einem Gas die Kohäsionskräfte vernachlässigen?
(4) Was muß man im allgemeinen bei realen Gasen beachten?
(5) Was vernachlässigt man bei dem Modell „ideales Gas"?

3.2. *Suchen Sie* zu den folgenden Verben entsprechende *Antonyme*, und *bilden Sie* mit den Verben *Aussagen* über physikalische Prozesse!

► Wenn man einen Körper erwärmt, so vergrößert sich seine innere Energie. Wenn man ihn abkühlt, so ...

(1) (sich) erwärmen –
(2) steigen –
(3) (sich) vergrößern –
(4) (sich) ausdehnen –
(5) zuführen –
(6) schmelzen –
(7) verdampfen –
(8) komprimieren –

4. Adjektive in antonymischer Bedeutung

Beantworten Sie Fragen!

(1) Wodurch unterscheidet sich ein Gas oberhalb und unterhalb des kritischen Punktes?
(2) Welche Größen sind in der Gleichung $p \cdot V = n \cdot R_0 T$ direkt oder indirekt proportional?
(3) Wie nennt man das allgemeine Gesetz, das den Übergang von kontinuierlichen Änderungen zu einer diskontinuierlichen Änderung beschreibt?
(4) Wie entsteht aus einer inhomogenen Gasmischung eine homogene Gasmischung?
(5) Wodurch unterscheidet sich die makrophysikalische Betrachtungsweise von der mikrophysikalischen Betrachtungsweise?
(6) Wodurch unterscheiden sich reversible und irreversible Prozesse?

5. Verben in synonymischer Bedeutung

zur Folge haben; bewirken

Beantworten Sie die Fragen! Verwenden Sie dabei „zur Folge haben" und „bewirken"! Mehrere Antworten sind möglich!

(1) Was kann die Wärmezufuhr bei einem festen Körper zur Folge haben?
(2) Was kann die Wärmezufuhr bei Wasser bewirken?
(3) Was kann eine Vergrößerung des Gasdruckes zur Folge haben?
(4) Was kann der thermische Kontakt von Körpern bewirken?

Temperaturerhöhung
Ausdehnung
Schmelzen
Vergrößerung der Dichte
verdampfen
Volumenverringerung
Wärmeübertragung

6. Zusammengesetzte Substantive

Bilden Sie zu den Bezugswörtern „Temperatur", „Wärme" und „Energie" *zusammengesetzte Substantive*!

- ► Anfangstemperatur
- ► Schmelzwärme
- ► Hydroenergie

Elektrik

12. Grundbegriffe des Gleichstromkreises

12.1. Die elektrische Stromstärke

Elektrische Erscheinungen können wir an ihren Wirkungen erkennen. Solche Wirkungen sind die Wärmewirkung, die chemische Wirkung, die magnetische Wirkung und die Lichtwirkung. Dabei sind auch Wirkungen auf den menschlichen Körper berücksichtigt. Man sagt, daß elektrische Wirkungen um so stärker sind, je stärker der elektrische Strom ist, der sie hervorruft.
Die Ursache aller elektrischen Erscheinungen ist die elektrische Ladung. Sie ist eine grundlegende Qualität der Teilchen, aus denen alle Stoffe aufgebaut sind, wie z. B. der Elektronen und Protonen. Diese Teilchen nennt man Elementarteilchen. Es gibt zwei verschiedene Arten der Ladung, die man als positive und negative Ladung bezeichnet. Ein Proton trägt eine positive elektrische Ladung, ein Elektron eine negative. Jedoch ist der Betrag der Ladung auf diesen geladenen Elementarteilchen stets gleich. Er wird als Elementarladung bezeichnet und kann nicht in kleinere Ladungsbeträge geteilt werden. Es gibt auch neutrale, d. h. ungeladene Teilchen, wie z. B. die Neutronen.
Da alle Stoffe aus Elementarteilchen bestehen, muß jede gegebene elektrische Ladung ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung sein. Deshalb können Ionen nur ein kleines ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung besitzen. Weil Ionen, Elektronen und andere Teilchen beweglich sein können und dabei ihre Ladung mit sich tragen, werden sie als Ladungsträger bezeichnet.
Nun kann der Begriff ‚elektrischer Strom' definiert werden:

► Elektrischer Strom ist eine geordnete Bewegung von Ladungsträgern.

Danach ist eine ungeordnete Bewegung von Ladungsträgern, z. B. die Wärmebewegung von Ionen in einem Gas, kein elektrischer Strom. Je stärker der Strom ist, desto mehr Ladungsträger müssen sich unter sonst gleichen Bedingungen bewegen. Zur quantitativen Beschreibung des elektrischen Stromes wird eine neue physikalische Größe eingeführt, die elektrische Stromstärke. Ihre Einheit ist das Ampere, A. Die elektrische Elementarladung ist sehr klein, deshalb bewegen sich bereits bei kleinen Strömen sehr viele Ladungsträger. Wenn z. B. ein elektrischer Strom der Stromstärke 1 A durch einen Draht fließt, so bewegen sich in jeder Sekunde etwa $6 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch die Querschnittsfläche des Drahtes.
Wenn sich die Ladungsträger immer in der gleichen Richtung bewegen, so haben wir einen Gleichstrom. Ist dabei Zahl und Geschwindigkeit der Ladungsträger konstant, so haben wir einen konstanten Gleichstrom. Bei einem Wechselstrom kehrt sich die Bewegung der Ladungsträger periodisch um.

12.2. Die elektrische Spannung

Zwischen zwei geladenen Körpern wirkt eine Kraft. Ladungen mit gleichem Vorzeichen stoßen sich ab, Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen ziehen sich an (s. 16.1.). Diese Kraft ist eine wesentliche Ursache des elektrischen Stromes. Die Kraftwirkung wird durch eine neue elektrische Größe beschrieben, die elektrische Spannung U. Ihre Einheit ist 1 Volt (V). Die Spannung und ihre Einheit werden in 14. definiert.
Spannungen kann man mit Hilfe von Stromquellen erhalten, z. B. aus einem Generator oder einem Akkumulator. In einer Stromquelle wird durch Energieumwandlung eine Ladungstrennung erreicht, so daß auf zwei Körpern, den Polen der Stromquelle, Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen vorhanden sind. Verbindet man die Pole durch einen elektrischen Leiter, so erzeugt die Spannung zwischen den Polen in ihm einen elektrischen Strom. In einem Metall bewegen sich dabei Elektronen vom negativen Pol der Stromquelle zum positiven Pol. Diese Richtung wird als physikalische Stromrichtung bezeichnet. Als man noch nicht wußte, daß der elektrische Strom eine Bewegung von Ladungsträgern ist, hatte man definiert, daß der Strom vom positiven zum negativen Pol fließt. Diese Richtung heißt die gesetzliche Stromrichtung.
Die Spannung, die zwischen zwei Punkten eines elektrischen Gerätes (Verbrauchers) anliegt, wird mit einem Spannungsmeßgerät (Voltmeter) gemessen, das parallel zum Verbraucher geschaltet wird (vgl. Abb. 12.1.). Die Stromstärke mißt man mit einem Strommeßgerät (Amperemeter). Es wird in Reihe mit dem Verbraucher geschaltet.

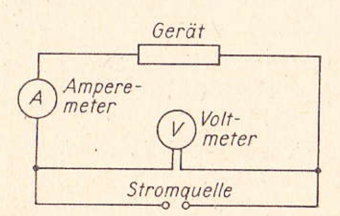


Abb. 12.1. Einfacher Stromkreis

12.3. Das Ohmsche Gesetz und der elektrische Widerstand

Je größer die Spannung in einem Stromkreis ist, desto größer ist unter sonst gleichen Bedingungen die Stromstärke. Dieser Zusammenhang wird im *Ohm*schen Gesetz quantitativ ausgedrückt:

▶ *Ohm*sches Gesetz:
Für einen gegebenen Leiter ist die fließende Stromstärke I direkt proportional zur anliegenden Spannung U, wenn alle anderen Größen, z. B. die Temperatur, konstant sind.

Durch $I \sim U$ ist eine Konstante U/I = konstant definiert. Diese Konstante ist der elektrische Widerstand R des gegebenen Leiters:

▶ Der elektrische Widerstand ist der Quotient aus Spannung und Stromstärke.
Seine Einheit ist 1 Ohm, Ω:
Wenn in einem Leiter durch die Spannung 1 V die Stromstärke 1 A erzeugt wird, so ist der elektrische Widerstand dieses Leiters $1\,\Omega = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{A}}$.

elektrischer Widerstand	$R = \frac{U}{I}$	$[R] = 1\,\Omega$

12.4. Die experimentelle Methode am Beispiel des Ohmschen Gesetzes

Wenn man nach gesetzmäßigen Zusammenhängen zwischen physikalischen Größen oder Erscheinungen sucht, benutzt man in vielen Fällen die experimentelle Methode. Sie ist ein wissenschaftliches Verfahren zur Aufstellung bzw. Prüfung von Hypothesen mit Hilfe von Experimenten. Obwohl das Experiment charakteristisch für die experimentelle Methode ist, stellt es nur einen Teil des gesamten Verfahrens dar. Zur experimentellen Methode gehören auch theoretische Überlegungen. Man kann die experimentelle Methode in fünf Schritten darstellen:

(1) Man geht von einer ganz bestimmten Zielstellung aus. Für den einfachen Stromkreis heißt das, daß man den gesetzmäßigen Zusammenhang von Spannung und Stromstärke sucht.
(2) Man überlegt sich, welche Vorkenntnisse man bereits besitzt. In unserem Beispiel wissen wir schon, daß man eine Spannung und einen geschlossenen Stromkreis haben muß, wenn ein Strom fließen soll, und daß der Strom um so stärker ist, je größer die Spannung ist.
(3) Man bildet eine Hypothese, die durch die Vorkenntnisse begründet ist. In unserem Beispiel heißt sie: Die Stromstärke ist proportional zur Spannung.
(4) Man plant und führt ein Experiment durch, um zu erkennen, ob diese Hypothese wahr oder falsch ist.
(5) Man wertet das Experiment aus und erkennt, ob die Hypothese wahr oder falsch ist.

Wortliste zum Text

ab/stoßen (sich) A
stieß ab, abgestoßen
der Akkumulator, -en
das Ampere, - (Einheit)
das Amperemeter, -
an/legen A an A
eine Spannung anlegen an A
an/liegen an D
lag an, angelegen
an/ziehen (sich) A
zog an, angezogen
aus/gleichen, sich
glich aus, ausgeglichen
das Bügeleisen, -
der Draht, ⸚e
ein/führen A
elektrisch
das Elektron, -en
der Elektrozug, ⸚e
die Elementarladung, -en
das Elementarteilchen, -
die Erscheinung, -en
existieren
ganzzahlig
der Generator, -en
der Gleichstrom, ⸚e
die Glühlampe, -n
grundlegend
das Ion, -en
je ..., desto ...
je ..., um so ...
der Kocher, -
laden A
lud, geladen
die Ladung, -en
elektrische Ladung
der Ladungsträger, -
die Ladungstrennung, -en
der Leiter, -
das Licht, o.
magnetisch
das Meßgerät, -e
neutral
das Neutron, -en
das Ohm, - (Einheit)
parallel
der Pol, -e
positiv
der Projektor, -en
das Proton, -en
schalten A
in Reihe schalten A mit D
parallel schalten A zu D
die Sicherung, -en
die Spannung, -en
der Strom, ⸚e
der Stromkreis, -e
die Stromquelle, -n
die Stromstärke, -n
der Tauchsieder, -
die Tendenz, -en
der Verbraucher, -
vervollständigen A
das Vielfache, -n
das Volt, - (Einheit)
das Voltmeter, -
die Vorkenntnis, -se
das Vorzeichen, -
der Widerstand, ⸚e
die Zielstellung, -en

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche physikalischen Größen braucht man zur Beschreibung des Gleichstromkreises?
2) Welche Wirkungen des elektrischen Stromes kann man unterscheiden?
3) Was ist elektrische Ladung?
4) Welche Teilchen werden als Ladungsträger bezeichnet?
5) Was versteht man unter elektrischem Strom?
6) Wie werden Amperemeter und Voltmeter geschaltet?
7) Wie lautet das *Ohm*sche Gesetz?
8) Wie heißt die Einheit des elektrischen Widerstandes, und wie ist sie definiert?
9) In welchen Schritten kann die experimentelle Methode dargestellt werden?
10) Welches Ziel hat die experimentelle Methode in der Physik?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Wirkungen des elektrischen Stromes

erweitertes Attribut

Ergänzen Sie den Text!

Die .... Wärmewirkung hängt von der Stärke des elektrischen Stromes ab. Eine große Bedeutung hat die .... chemische Wirkung des elektrischen Stromes. Die .... magnetische Wirkung und die .... Lichtwirkung haben auch eine große Bedeutung.

- in der Glühlampe entstehen
- durch den Tauchsieder nutzen
- bei Generatoren nutzen
- bei Akkumulatoren nutzen

2.2. Elektrische Ladung

2.2.1. *Definieren Sie die folgenden Begriffe!*

Attributsatz

Verwenden Sie als charakteristische Eigenschaft bezüglich des Oberbegriffs die Ladungsarten!

► Ein Elektron ist ein Teilchen (Ladungsträger), das (der) negativ geladen ist.

(1) Elektron, (2) Proton, (3) Neutron, (4) Atom, (5) Positron, (6) Ion

2.2.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

erweitertes Attribut

Was für Teilchen sind

Elektronen?	elektrisch neutral
Protonen?	positiv oder negativ geladen
Neutronen?	negativ geladen
Ionen?	positiv geladen

2.3. Die Richtung des elektrischen Stromes

Unterscheiden Sie

(1) Gleichstrom und Wechselstrom
(2) gesetzliche Stromrichtung und physikalische Stromrichtung!

2.4. Strom und Ladungsträger

2.4.1. Welche Folge haben die Aussagen (1) bis (3)?

Konsekutivsatz

Verbinden Sie jeweils 2 Sätze!

► Man verbindet die Pole einer Stromquelle durch einen Leiter, so daß ...

(1) Man verbindet die Pole einer Stromquelle durch einen Leiter.	Eine beliebige Ladung kann nur ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung sein.
(2) Die Elementarladung kann man nicht teilen.	Ein Strom kann fließen.
(3) Die Elementarladung ist sehr klein.	Bereits bei 1 A bewegen sich in jeder Sekunde $6 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch die Querschnittsfläche eines Drahtes.

2.4.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

Proportionalsatz

In welchem Zusammenhang stehen (unter sonst konstanten Bedingungen)

(1) elektrischer Strom und seine Wirkung?
(2) elektrischer Strom und Anzahl der Ladungsträger?
(3) Differenz der Anzahl der Elektronen auf den Polen einer Stromquelle und Spannung?
(4) Stromstärke und Spannung?

2.5. Stromstärke und Spannung

anliegen an D
anlegen A an A

2.5.1. *Beantworten Sie die Fragen!*
Verwenden Sie dabei die angegebenen Verben!
Auf eine Frage sind mehrere Antworten möglich.

► An einem Widerstand kann eine Spannung anliegen.
► An einen Widerstand kann man eine Spannung anlegen.
► An einen Widerstand legt man eine Spannung an.
► An einem Widerstand liegt eine Spannung an.

(1) Wo kann eine Spannung anliegen?	Widerstand
(2) Wo kann man eine Spannung anlegen?	Glühlampe
(3) Wo legt man eine Spannung an?	Meßgerät
(4) Wo liegt eine Spannung an?	Verbraucher
	Projektor
	elektrisches Gerät

2.5.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

in Reihe schalten A mit D
parallel schalten A zu D

(1) Wie schaltet man ein Spannungsmeßgerät?	in Reihe mit dem Verbraucher
(2) Wie sind Voltmeter und Verbraucher geschaltet?	parallel zum Verbraucher
(3) Wie schaltet man ein Strommeßgerät?	in Reihe geschaltet
(4) Wie sind Amperemeter und Verbraucher geschaltet?	parallel geschaltet

2.5.3. *Beantworten Sie die Fragen!*

Angabe einer Bedingung

Unter welcher Bedingung

(1) ist die Wirkung des Stromes groß?	Widerstand ist konstant
(2) ist der elektrische Strom sehr stark?	Anzahl der bewegten Ladungsträger ist groß
(3) ist die Spannung groß?	Strom ist stark
(4) fließt ein elektrischer Strom?	Differenz der Anzahl der Elektronen an den Polen ist groß
(5) sind U und I proportional?	Pole sind durch einen Leiter verbunden

2.6. Wichtige Begriffe des Gleichstromkreises

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach
(1) physikalischen Größen, (2) Teilchen, (3) Geräten!
Nennen Sie einen Oberbegriff für die Begriffe, die Sie nicht einordnen können!

Widerstand, Ampere, Spannung, Elektron, Stromquelle, Ohm, Proton, Generator, Stromstärke, Verbraucher, Ion, Volt, Akkumulator, Ladungsträger

2.7. Beispiel für einen Stromkreis

Sprechen Sie über den Stromkreis in Abb. 12.2., indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Aus welchen Geräten besteht der Stromkreis?
(2) Wie sind die einzelnen Geräte geschaltet?

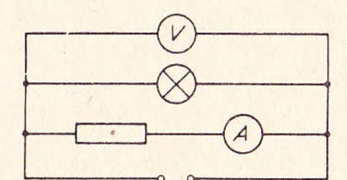


Abb. 12.2.

3. Übungen zum Thema

3.1. Ein Experiment zum Ohmschen Gesetz

Beschreiben Sie ein Experiment, das die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes bestätigt! Beachten Sie die folgenden Hinweise!

(1) Aus Beobachtungen folgt: Je größer die Spannung ist, desto größer ist die Stromstärke.
(2) Ziel des Experimentes: Bestätigung eines gesetzmäßigen Zusammenhangs zwischen U und I.
(3) Aus (1) folgen theoretisch viele Möglichkeiten, z. B.:

$U \sim I \qquad U \sim I^2 \qquad U \sim \sqrt{I}$

Man bildet die Hypothese $U \sim I$, weil in der Natur sehr oft einfache Zusammenhänge existieren.
(4) Experiment zur Bestätigung der Hypothese:
Geräte und Schaltung,
Beachtung der Bedingungen,
Messung,
Ergebnis der Messung

3.2. Formelzeichen und Schaltzeichen

Vervollständigen Sie die Tabellen!

Tabelle 12.1.

physikalische Größen

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
	I	
Spannung		
		Ohm, Ω

Tabelle 12.2.

Geräte

Bezeichnung	Schaltzeichen
Amperemeter	
	(V)
	—▭—
Glühlampe	
	—o o—
Wechselstromquelle	

4. Textaufgaben

57. Ergänzen Sie die Tabelle! Wenden Sie das *Ohm*sche Gesetz an!

Tabelle 12.3.

Beispiel	Spannung	Stromstärke	Widerstand
(1) Kocher	220 V	5 A	
(2) Radiowiderstand		2 mA	50 kΩ
(3) Hochspannungsleitung	220 kV	2000 A	
(4) Kleinglühlampe	18 V		90 Ω
(5) Elektrozug	600 V		0,1 Ω
(6) Tauchsieder		1,5 A	147 Ω

58. Welche Stromstärke fließt durch ein Bügeleisen von 48,4 Ω bei einer Spannung von 220 V?

59. Welchen (Gesamt-)Widerstand müssen die elektrischen Geräte in einer Wohnung bei 220 V mindestens haben, wenn der Strom über eine 10-A-Sicherung fließt?

60. Bei einer Spannung von 270 V fließt ein Strom von 2,16 A durch einen gegebenen Widerstand. Wie groß ist die Spannung, wenn die Stromstärke 2 A beträgt?

13. Das Widerstandsgesetz und die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

13.1. Das Widerstandsgesetz

Wir haben festgestellt, daß der Widerstand eines Leiters durch Messung von Stromstärke und Spannung und Anwendung des *Ohm*schen Gesetzes gefunden werden kann. Weitere Untersuchungen zeigen, daß der Widerstand von der Länge l und der Querschnittsfläche A des Leiters abhängt. Es gilt $R \sim \frac{l}{A}$ für einen bestimmten Stoff und eine gegebene Temperatur. Das bedeutet, daß $\frac{RA}{l}$ konstant ist. Diese Konstante ist der spezifische Widerstand des Stoffes, aus dem der Leiter besteht. Er wird durch ϱ bezeichnet. Damit erhalten wir das Widerstandsgesetz:

Widerstandsgesetz	$R = \varrho \frac{l}{A}$	für T = konstant

Die Tabelle zeigt einige Beispiele für Werte des spezifischen Widerstandes:

Tabelle 13.1. Spezifischer Widerstand einiger Metalle

Metall (bei 20 °C)	ϱ in $\frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}$
Silber	0,015
Kupfer	0,0175
Aluminium	0,024
Eisen	0,10
Konstantan	0,50

Als Einheit der Querschnittsfläche verwendet man hier mm², da sehr oft Drähte mit einem kleinen Querschnitt untersucht werden. Konstantan ist eine Legierung aus etwa 60% Kupfer und 40% Nickel mit Spuren von Eisen und Mangan. Aus ihr werden Widerstandsdrähte hergestellt, weil ihr Widerstand fast nicht von der Temperatur abhängt (s. u.).

■ **Lehrbeispiel:**

Wieviel m Kupferdraht von 1 mm Durchmesser haben einen Widerstand von 0,7 Ω?

S_1 gegeben:

$d = 1$ mm, $R = 0{,}7\ \Omega$

Das Material ist Kupfer. Sein spezifischer Widerstand ist

$$\varrho = 0{,}0175\ \frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}},$$

gesucht: l

S_2 Da der Durchmesser gegeben ist, müssen wir einen Draht mit kreisförmiger Querschnittsfläche annehmen. Ihr Flächeninhalt ist $A = \frac{1}{4}\pi d^2$. Dann hat das Widerstandsgesetz die Form $R = \frac{4\varrho l}{\pi d^2}$.

S_3 $$l = \frac{R\pi d^2}{4\varrho} = \frac{0{,}7\ \Omega \cdot 3{,}14 \cdot 4\ \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{4 \cdot 0{,}0175\ \Omega\ \text{mm}^2} = 125{,}6\ \text{m}$$

125,6 m Kupferdraht von 1 mm Durchmesser haben einen Widerstand von 0,7 Ω.

13.2. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

Der elektrische Widerstand entsteht dadurch, daß die sich im Leiter bewegenden Ladungsträger durch die Eigenbewegung der Atome und Moleküle des Leiters gehemmt werden. Mit steigender Temperatur verstärkt sich diese Eigenbewegung, so daß die Bewegung der Ladungsträger mehr als vorher gehemmt wird. Das bedeutet, daß sich der Widerstand eines Leiters und damit auch sein spezifischer Widerstand mit steigender Temperatur im allgemeinen erhöhen. Bei vielen Stoffen gilt für den spezifischen Widerstand ϱ_ϑ bei der *Celsius*temperatur ϑ diese Näherungsgleichung:

spezifischer Widerstand bei *Celsius*temperatur ϑ	$\varrho_\vartheta = \varrho_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta)$

Dabei ist ϱ_{20} der spezifische Widerstand bei 20 °C (vgl. Tabelle 13.1.), $\Delta\vartheta$ die Temperaturdifferenz gegenüber der Bezugstemperatur von 20 °C, und α ist der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes. Es gibt allerdings auch Stoffe, z. B. die Halbleiter, in denen bei Erwärmung neue Ladungsträger gebildet werden. Der Widerstand dieser Leiter sinkt deshalb bei Erwärmung. Außerdem kann man Legierungen herstellen, deren Widerstand fast nicht von der Temperatur abhängig ist, wie z. B. Konstantan (s. o.).

13.3. Stufen des Erkenntnisprozesses am Beispiel des Widerstandsgesetzes

Wenn wir untersuchen, wie wir in der Physik Naturgesetze erkennen, so stellen wir fest, daß wir auf einem ganz bestimmten Wege neue Erkenntnisse erhalten. Nach *Lenin* unterscheiden wir dabei die folgenden drei Stufen:

(1) Neue Erkenntnis beginnt mit der lebendigen Anschauung, d. h., daß wir Beobachtungen oder Experimente machen. So wird experimentell untersucht, wie der Widerstand eines Leiters von der Länge und der Querschnittsfläche abhängt.

(2) Der nächste Schritt ist das abstrakte Denken. Dadurch kommen wir zur Theorie. Die Ergebnisse der Beobachtungen werden abstrakt dargestellt, so erhalten wir die Gleichung $R = \varrho \frac{l}{A}$.

(3) Zuletzt wird die Theorie in der Praxis angewendet. Mit Hilfe des Widerstandsgesetzes können wir Widerstände herstellen, die wir für ganz bestimmte praktische Aufgaben benötigen. Damit ist die Praxis das Kriterium für die Wahrheit der Theorie.

Dieser aus drei Stufen bestehende Erkenntnisprozeß wiederholt sich laufend, wodurch sich das Wissen der Menschen immer mehr vergrößert. Das gilt nicht nur in der Physik, sondern prinzipiell auch für alle anderen Wissenschaften.

Wortliste zum Text

abstrakt
die Anschauung
der Durchmesser, –
das Eisen, o.
der Erkenntnisprozeß, Erkenntnisprozesse
der Flächeninhalt, –e
der Halbleiter, –
hemmen A
das Konstantan, o.
das Kriterium, Kriterien
lebendig
die Legierung, –en
das Mangan, o.
die Näherungsgleichung, –en
das Nickel, o.
die Norm, –en
die Normtemperatur, –en

die Querschnittsfläche, –n
das Silber, o.
die Stufe, –n
verstärken, (sich) A
wahr
die Wahrheit
ziehen A
zog, gezogen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wie heißt das Widerstandsgesetz, und welche Bedeutung haben die darin auftretenden Größen?
2) Wie ist der spezifische Widerstand definiert?
3) Wie kann man den elektrischen Widerstand erklären?
4) Wie kann man die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes erklären?
5) Was ist Konstantan?
6) Welche Eigenschaften hat ein Halbleiter?
7) Nennen Sie die Stufen der *Lenin*schen Darstellung des Erkenntnisprozesses!
8) Wie erkennt man, ob eine Theorie wahr oder falsch ist?

2. Übungen zum Text

2.1. Der Zusammenhang zwischen einigen physikalischen Größen

2.1.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

Proportionalsatz

Welcher Zusammenhang besteht (unter sonst konstanten Bedingungen) zwischen
(1) dem Widerstand und der Länge des Leiters?
(2) dem Widerstand und der Querschnittsfläche des Leiters?
(3) der Stromstärke und dem Widerstand?
(4) dem spezifischen Widerstand eines metallischen Leiters und der Temperatur?
(5) dem spezifischen Widerstand eines Halbleiters und der Temperatur?

2.1.2. *Beantworten Sie, soweit möglich, die Fragen* der Übung 2.1.1., indem Sie ‚direkt proportional' und ‚indirekt proportional' verwenden!

direkt proportional/indirekt proportional

2.2. Verschiedene Bedeutungen von ‚Widerstand'

2.2.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Wenn durch einen Stoff ein Strom fließt, so bedeutet das eine .... Bewegung von .... Die Bewegung der Ladungsträger wird durch die .... der Atome und Moleküle .... Diese Eigenschaft jedes Stoffes bezeichnet man als .... Unter dem Widerstand versteht man aber auch eine .... Schließlich bezeichnet man auch bestimmte .... als Widerstand.	Eigenbewegung Widerstand ordnen hemmen Ladungsträger Geräte physikalische Größe

2.2.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Wie ist die physikalische Größe ‚Widerstand' definiert?
(2) Welche Eigenschaft der Stoffe wird mit dem Begriff ‚Widerstand' beschrieben?
(3) Was bezeichnet man noch als Widerstand?

2.3. Die Änderung des Widerstandes eines Stoffes

2.3.1. *Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!*

Angabe einer Bedingung oder eines Grundes

(1) Was geschieht, wenn die Temperatur eines Leiters steigt?
(2) Warum vergrößert sich bei Temperaturerhöhung der Widerstand eines Leiters?
(3) Was geschieht, wenn man die Länge eines Leiters vergrößert?
(4) Unter welcher Bedingung vergrößert sich der Widerstand eines Leiters?
(5) Warum verringert sich der Widerstand eines Leiters bei Vergrößerung seiner Querschnittsfläche?
(6) Was geschieht, wenn die Temperatur eines Halbleiters steigt?
(7) Warum verringert sich der Widerstand eines Halbleiters bei Erwärmung?

2.3.2. *Sprechen Sie* über die Möglichkeiten der Änderung des elektrischen Widerstandes bei Leitern und Halbleitern! Verwenden Sie dazu auch die Antworten der Übung 2.3.1.!

2.3.3. *Erklären Sie* die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Metallen und Halbleitern!

2.4. Aussagen über den Widerstand

Angabe eines Grundes

Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen! Verwenden Sie Kausalsätze!

(1) Der Widerstand eines Leiters hängt von der angelegten Spannung ab.
(2) Der Widerstand eines Leiters ist temperaturabhängig.
(3) Der Widerstand eines Leiters ändert sich, wenn sich die Länge ändert.
(4) Der Widerstand eines Leiters hängt von der Stromstärke ab.
(5) Der spezifische Widerstand vergrößert sich, wenn die Temperatur steigt.
(6) Der Widerstand von Konstantan hängt nicht von der Temperatur ab.

3. Übungen zum Thema

3.1. Die mathematische Beschreibung elektrischer Eigenschaften

Interpretieren Sie (vgl. S. 29) die folgenden Gleichungen!

(1) $U = RI$

(2) $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$

(3) $\varrho_\vartheta = \varrho_{20}(1 + \alpha \Delta\vartheta)$ für $\alpha > 0$, $\alpha < 0$ und $\alpha = 0$

3.2. Die Bedeutung des spezifischen Widerstandes

Üben Sie zu zweit!
Informieren Sie sich bei einem Freund über den spezifischen Widerstand verschiedener Stoffe und über die sich daraus ergebende Verwendung! Ihr Freund beantwortet Ihre Fragen mit Hilfe einer Tabelle!

3.3. Experimente zum Nachweis der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes

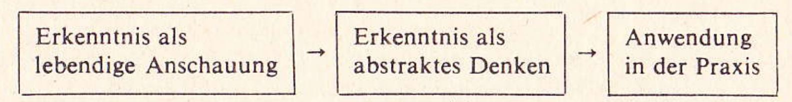
3.3.1. *Beschreiben Sie* ein Experiment, das die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes eines Leiters nachweist! Beachten Sie folgende Hinweise!

(1) Geräte und Schaltung der Geräte
(2) Beobachtung während des Experimentes
(3) Bedeutung der Beobachtung (Auswertung der Beobachtung)

3.3.2. *Beschreiben Sie* ein Experiment, das die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Glas nachweist!

3.4. **Der Erkenntnisprozeß**

Die folgenden Aussagen sollen den drei Stufen der *Lenin*schen Darstellung des Erkenntnisprozesses zugeordnet werden.



Zu welcher Erkenntnisstufe gehören die folgenden Aussagen?
Begründen Sie Ihre Zuordnung!

(1) Beim Bau technischer Geräte beachtet man die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes.
(2) Bei Experimenten kann man beobachten, daß sich bei Temperaturänderung auch der Widerstand ändert.
(3) Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes wird durch die Gleichung $\varrho_\vartheta = \varrho_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta)$ dargestellt.
(4) Man kann beobachten, daß sich der Widerstand ändert, wenn man die Querschnittsfläche eines Leiters ändert.
(5) Den Zusammenhang zwischen Widerstand, Länge und Querschnittsfläche des Leiters beschreibt die Gleichung $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$.
(6) Bei elektrischen Leitungen beachtet man sehr genau die Querschnittsfläche und das Material des Leiters.

4. Textaufgaben

61. Welchen Widerstand hat eine Telefonleitung aus Kupfer von 4,5 km Länge und 4 mm Durchmesser?

62. Welche Drahtlänge ist für einen Drahtwiderstand von 300 Ω aus Konstantandraht von 0,5 mm Durchmesser notwendig?

63. In einem Experiment zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes erhält man an einem Meßdraht folgende Werte:

$U = 0{,}50$ V $\qquad I = 32{,}7$ mA

$l = 5{,}0$ m $\qquad d = 0{,}10$ mm

Welchen spezifischen Widerstand hat das Material des Drahtes?

64. Ein Draht wird (bei konstantem Volumen) durch Ziehen um 20% verlängert. Wie und um wieviel % ändert sich dabei sein Widerstand?

65. In welchem Verhältnis stehen (1) die Durchmesser, (2) die Massen eines Aluminiumdrahtes und eines Kupferdrahtes von gleicher Länge und gleichem Widerstand?

66. Wie groß ist der spezifische Widerstand von Eisen bei 100 °C?

67. Zur Messung des Temperaturkoeffizienten wird ein Meßdraht von 20 °C auf 84 °C erwärmt. Dabei nimmt sein Widerstand um 4% zu. Welchen Wert hat der Temperaturkoeffizient des Widerstandes?

14. Die elektrische Arbeit und die elektrische Leistung

Wenn in einem Leiter ein Strom fließt, so erwärmt sich der Leiter. Das bedeutet, daß elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. In einem Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Sowohl die auftretende Wärmemenge als auch die vom Motor verrichtete mechanische Arbeit sind äquivalent zur elektrischen Arbeit W_{el}, die durch den Strom bewirkt wird. Ebenso wie die Wärmemenge und die mechanische Arbeit werden elektrische Energie und elektrische Arbeit in Joule gemessen:

$$[W_{el}] = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J}$$

Der Quotient aus der verrichteten elektrischen Arbeit und der dazu benötigten Zeit t ist die elektrische Leistung P_{el}. Ihre Einheit ist 1 Watt (W):

elektrische Leistung	$P_{el} = \frac{W_{el}}{t}$	$[P_{el}] = 1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$

Deshalb wird anstelle von Joule auch die Bezeichnung Wattsekunde verwendet:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

Jetzt kann die elektrische Spannung definiert werden (s. 12.2.). Sie ist der Quotient aus der elektrischen Leistung und der Stromstärke:

elektrische Spannung	$U = \frac{P_{el}}{I}$	$[U] = 1 \text{ V} = \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ A}}$

Damit ist

$$P_{el} = U I \quad \text{und} \quad W_{el} = U I t.$$

In der technischen Praxis werden auch die folgenden größeren Einheiten für die elektrische Arbeit bzw. die elektrische Leistung verwendet:

1 Kilowattstunde = 1 kWh = $3{,}6 \cdot 10^6$ Ws

1 Kilowatt = 1 kW = 10^3 W

1 Megawatt = 1 MW = 10^6 W

Die Versorgung der Industrie und der Landwirtschaft, der Transportmittel und der Haushalte mit Elektroenergie ist eine Grundaufgabe der Energiewirtschaft. Auf die große Bedeutung der Elektroenergie für die ökonomische Stärke eines Landes wies *Lenin* hin, als er 1920 für die sozialistische Entwicklung Sowjetrußlands feststellte: „Kommunismus, das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes“.

Wortliste zum Text

der Elektromotor, -en
der Energiewandler, -
die Energiewirtschaft, o.
hervor/rufen A
rief hervor, hervorgerufen
das Kilowatt, - (Einheit)
der Leistungsbedarf, o.
das Megawatt, - (Einheit)
die Pro-Kopf-Produktion, o.
das Sowjetrußland, o.
die Stärke, -n
die Versorgung, o.
das Watt, - (Einheit)
die Wattsekunde, -n (Einheit)

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Beispiele für die Umwandlung von Elektroenergie in andere Energieformen nennt der Text!
2) Was bedeutet der Begriff ‚elektrische Arbeit'?
3) Welche Gleichung gilt für die elektrische Arbeit?
4) Wie begründet man die Gleichung 1 kWh = $3{,}6 \cdot 10^6$ J?
5) Was versteht man allgemein unter Leistung?
6) Welche Gleichung gilt für die elektrische Leistung?
7) In welchen Einheiten kann man die elektrische Leistung messen?

2. Übungen zum Text

2.1. Elektrische Arbeit und Leistung

Interpretieren Sie die Gleichungen für die elektrische Arbeit und Leistung!

2.2. Energieumwandlungen

Sprechen Sie über die Energieumwandlungen in einem Leiter und in einem Elektromotor!

3. Übungen zum Thema

3.1. Leistungsangaben – Beispiele aus der Praxis

Sprechen Sie über die Beispiele!
► Eine Glühlampe hat eine Leistung von 15 bis 200 W. 200 W sind 0,2 kW.

Verbraucher (Energiewandler)	Leistung in W
Glühlampe	15 bis 200
Bügeleisen	$4 \cdot 10^2$ bis $1{,}2 \cdot 10^3$
Generator	$5 \cdot 10^8$
Lokomotive	$5 \cdot 10^6$
Straßenbahn	$5 \cdot 10^5$

3.2. Fragen der Energiewirtschaft

3.2.1. *Sprechen Sie* über Probleme der Energiewirtschaft in Ihrem Land!

3.2.2. *Sprechen Sie* über den Leistungsbedarf der Industrie eines Landes in Abhängigkeit von der Tageszeit! Welche Probleme ergeben sich daraus, und wie löst man sie? Beachten Sie bei Ihrem Vortrag die Abb. 14.1.!

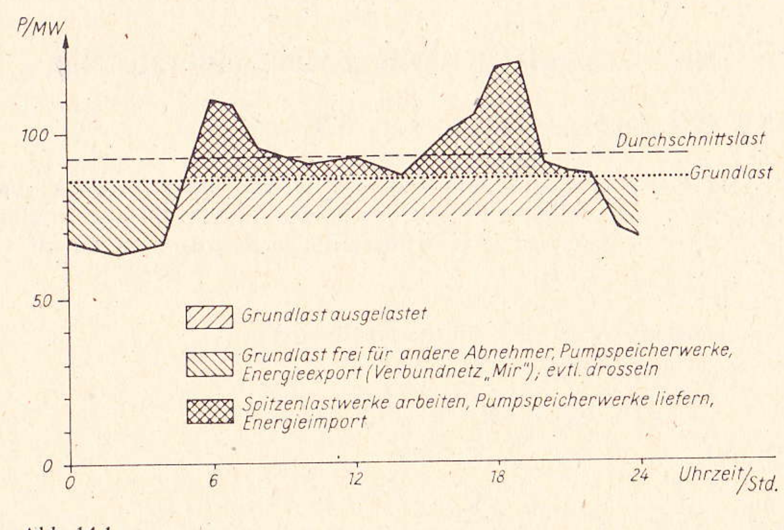


Abb. 14.1.

4. Textaufgaben

68. Berechnen Sie die Leistung in den Beispielen der Aufgabe 57. auf S. 117!

69. 220-V-Glühlampen gibt es zu (1) 25 W, (2) 40 W, (3) 60 W, (4) 75 W und (5) 100 W. Welchen Stromstärken entspricht das?

70. Eine Glühlampe hat bei 220 V Spannung eine Leistung von 100 W. Wie groß wird die Leistung, wenn die Spannung bei konstantem Widerstand der Lampe auf 190 V sinkt?

71. Die Gesamtleistung der Kraftwerke der DDR betrug 1975 15800 MW. Wieviel Elektroenergie kann damit jährlich erzeugt werden, wenn die Kraftwerke ständig mit der vollen Leistung arbeiten? (vgl. auch Aufgabe 72.)

72. Die Pro-Kopf-Produktion an Elektroenergie betrug 1975 in der DDR bei 17 Mill. Einwohnern 5000 kWh. Welcher durchschnittlichen Kraftwerksleistung entspricht das? (vgl. auch Aufgabe 71.)

73. Welche Leistung nimmt ein 150 m langer Kupferdraht von 2 mm² Querschnittsfläche auf, durch den ein Strom von 4 A fließt?

74. Welche Wärmemenge gibt eine 100 m lange Doppelleitung aus Kupfer von 4 mm² Querschnittsfläche in einer Stunde an die Umgebung ab, wenn sie von 6 A durchflossen wird?

15. Die Zusammenschaltung von Widerständen

15.1. Die Reihenschaltung von Widerständen

Zwei Widerstände können so miteinander verbunden werden, wie es die Abb. 15.1. zeigt. Man erkennt sofort, daß die Stromstärken I_1, I_2 und I, die an verschiedenen Stellen dieses Stromkreises gemessen werden können, gleich sein müssen:

$$I_1 = I_2 = I.$$

Diese Schaltung wird als Reihenschaltung bezeichnet.

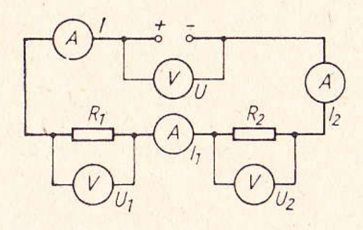


Abb. 15.1. Zur Reihenschaltung von Widerständen

Im Stromkreis kann man an der Stromquelle die Gesamtspannung U und an den in Reihe geschalteten Widerständen die Teilspannungen U_1 und U_2 messen. Dabei gilt

$$U = U_1 + U_2$$

Daraus folgert man, daß es einen Widerstand $R = R_1 + R_2$ gibt, der die gleiche Wirkung hat wie R_1 und R_2 zusammen. Er wird als Gesamtwiderstand oder Ersatzwiderstand der in Reihe geschalteten Widerstände bezeichnet. Diese Ergebnisse gelten auch für mehr als zwei Widerstände in einer Reihenschaltung:

► Die Stromstärke ist an jeder Stelle des Stromkreises gleich groß.
Die Summe der Teilspannungen ist gleich der Gesamtspannung:

$$U = U_1 + U_2 + \dots U_n$$

► Die Summe der Teilwiderstände ist gleich dem Gesamtwiderstand:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Die Teilspannungen nennt man auch Spannungsabfälle, da an jedem Widerstand die Gesamtspannung um einen bestimmten Betrag abfällt.
Die an einer Stromquelle gemessene Spannung ist um so kleiner, je stärker der Strom ist, den die Stromquelle abgibt.
Man nimmt deshalb an, daß die Stromquelle einen inneren Widerstand R_i hat, an dem durch die Stromstärke I der innere Spannungsabfall $U_i = IR_i$ entsteht. Die mit der Stromquelle verbundenen Widerstände haben den Gesamtwiderstand R. An ihm fällt die Spannung $U = RI$ ab, die man jetzt als Klemmenspannung bezeichnet. Die Gesamtspannung $E = U + U_i$ heißt Urspannung der Stromquelle (vgl. Abb. 15.2.). Damit gilt das *Ohm*sche Gesetz für den gesamten Stromkreis in der Form

$$I = \frac{E}{R_i + R}.$$

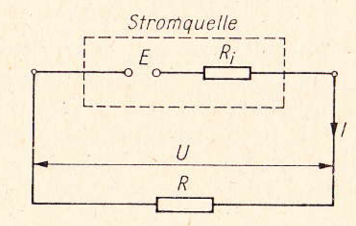


Abb. 15.2. Urspannung E und Klemmenspannung U

15.2. Die Parallelschaltung von Widerständen

Darunter verstehen wir eine Schaltung, wie sie Abb. 15.3. zeigt. Man erkennt, daß sich der vom Pluspol der Stromquelle kommende Strom mit der Stromstärke I im Punkt A teilt, so daß in den Widerständen R_1 und R_2 die Teilstromstärken I_1 und I_2 fließen, deren Summe gleich der Gesamtstromstärke I ist:

$$I = I_1 + I_2$$

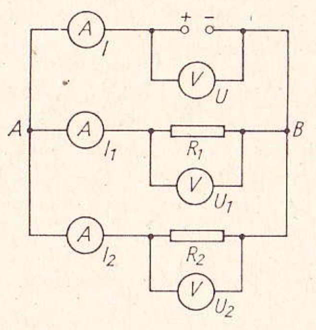


Abb. 15.3. Zur Parallelschaltung von Widerständen

In B fließen die Teilströme wieder zusammen. Die Spannung U an der Stromquelle ist gleich den Spannungen U_1 und U_2 an den Widerständen:

$$U = U_1 = U_2$$

Daraus folgt für den Ersatzwiderstand der parallelgeschalteten Widerstände:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Auch diese Ergebnisse kann man auf mehrere Widerstände verallgemeinern:

- An jedem Widerstand liegt die gleiche Spannung. Die Summe der Teilstromstärken ist gleich der Gesamtstromstärke:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

- Der reziproke Wert des Gesamtwiderstandes ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

15.3. Gemischte Schaltungen

Gemischte Schaltungen sind Kombinationen von Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen. Sie entstehen dadurch, daß man zu einer gegebenen Reihen- oder Parallelschaltung weitere Widerstände oder Widerstandsgruppen in Reihe oder parallel schaltet. Auch in gemischten Schaltungen gelten die Gleichungen für den Ersatzwiderstand bei Reihen- bzw. Parallelschaltung. Die elementarsten Formen einer gemischten Schaltung sind in den folgenden Schaltbildern gegeben.
In Abb. 15.4. berechnet man zuerst den Ersatzwiderstand der in Reihe geschalteten Widerstände. Dieser Ersatzwiderstand liegt parallel zum Widerstand von 2 Ω. In Abb. 15.5. beginnt man mit dem Ersatzwiderstand der Parallelschaltung.

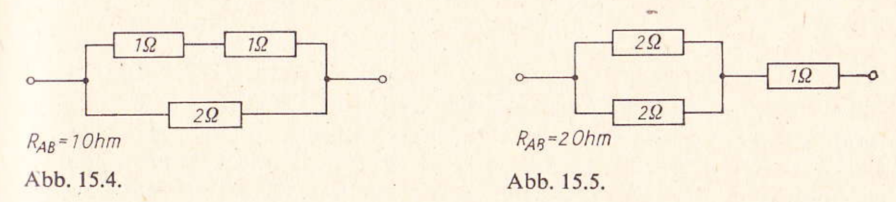


Abb. 15.4. Abb. 15.5.

In einer komplizierteren gemischten Schaltung findet man ebenfalls Parallel- und Reihenschaltungen, deren Ersatzwiderstände nach den oben genannten Gleichungen berechnet werden können. Mit diesen Ersatzwiderständen zeichnet man das gegebene Schaltbild neu und wiederholt die Methode, bis man nur noch einen Widerstand hat.

Lehrbeispiel:

Wie groß ist der Ersatzwiderstand der gegebenen Schaltung (vgl. Abb. 15.6.)?
Zuerst muß man erkennen, daß die Widerstände von 2 Ω und 4 Ω in Reihe geschaltet sind. Mit dieser Reihenschaltung beginnt man. Ihr Gesamtwiderstand ist 6 Ω. Mit diesem Widerstand wird das Schaltbild neu gezeichnet (vgl. Abb. 15.7.). Nun sieht man, daß die Widerstände von 6 Ω und 3 Ω parallelgeschaltet sind. Ihr Ersatzwiderstand ist deshalb 2 Ω. Dadurch erhält man Abb. 15.8. Jetzt betrachtet man

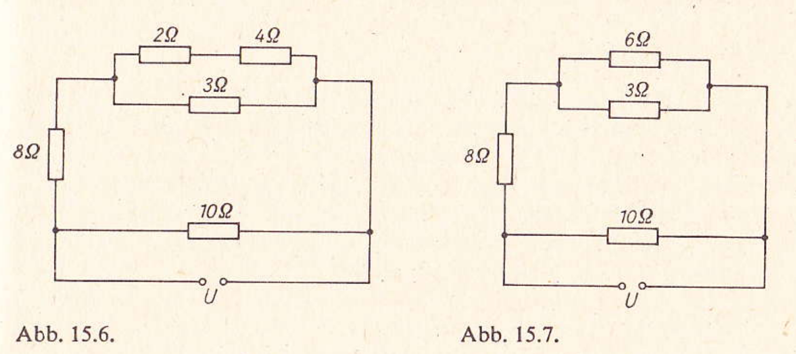


Abb. 15.6. Abb. 15.7.

8 Ω und 2 Ω in Reihe. Das ergibt 10 Ω. Damit bekommt man ein Schaltbild wie in Abb. 15.9. Man hat nun zwei parallelgeschaltete Widerstände von je 10 Ω. Der Ersatzwiderstand der gesamten Schaltung ist deshalb 5 Ω (vgl. Abb. 15.10.).

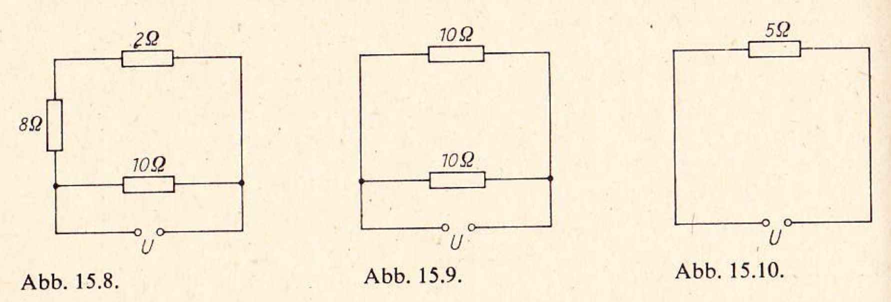


Abb. 15.8. Abb. 15.9. Abb. 15.10.

Der Ersatzwiderstand der Schaltung nach Abb. 15.11. kann nach dieser Methode nicht bestimmt werden. Die hier auftretenden Widerstände sind weder in Reihe noch parallelgeschaltet. Diese Schaltung ist keine gemischte Schaltung, sondern ein Netz. Seine Berechnung erfordert außer den Gleichungen für den Gesamtwiderstand bei Reihen- und Parallelschaltung noch andere Gesetze.

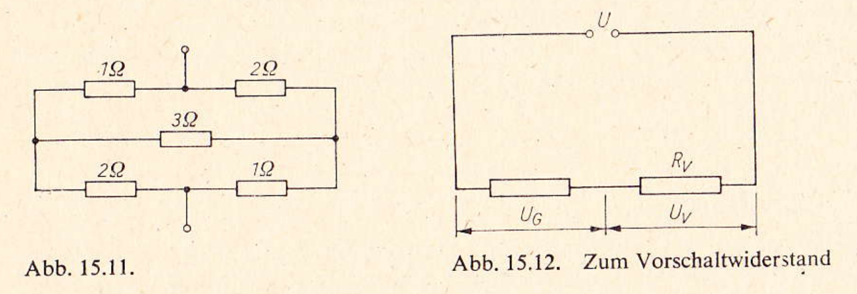


Abb. 15.11. Abb. 15.12. Zum Vorschaltwiderstand

15.4. Anwendungen der Parallelschaltung und der Reihenschaltung von Widerständen

15.4.1. Der Vorschaltwiderstand

Gegeben ist ein elektrisches Gerät, das für eine bestimmte Spannung U_G konstruiert ist und bei dieser Spannung die Leistung P hat. Wenn nur eine Stromquelle mit der Spannung $U > U_G$ vorhanden ist, so darf das Gerät nicht direkt mit ihr verbunden werden, weil dann die Stromstärke zu groß wird. In diesem Falle kann das Gerät über einen Vorschaltwiderstand an die Stromquelle angeschlossen werden. Der Vorschaltwiderstand R_V muß so gewählt werden, daß an ihm die Spannung $U_V = U - U_G$ abfällt (vgl. Abb. 15.12.).

■ **Lehrbeispiel:**

Ein elektrisches Gerät für 110 V/100 W soll über einen Vorschaltwiderstand an 220 V angeschlossen werden. Wieviel Ω muß der Vorschaltwiderstand haben, und welche Stromstärke fließt in ihm?

S_1 gegeben:

$U_G = 110$ V,

$P = 100$ W,

$U = 220$ V,

gesucht:

R_V, I

S_2 Die Stromstärke beträgt $I = P/U_G$ an allen Stellen des Stromkreises, da wir eine Reihenschaltung haben. Die Spannung an R_V ist $U_V = U - U_G$. Also ist $R_V = U_V/I = (U - U_G)\, U_G/P$.

S_3 $R_V = 121\ \Omega$ und $I = 0{,}91$ A. Der Vorschaltwiderstand muß 121 Ω haben, und in ihm fließt eine Stromstärke von 0,91 A.

15.4.2. Der Spannungsteiler

Ein Widerstand liegt an der Spannung U. Durch den Gleitkontakt A arbeitet er wie eine Reihenschaltung von R_1 und R_2. An R_1 fällt die Spannung U_1 ab. Durch Verschieben des Gleitkontaktes kann U_1 im Intervall von 0 bis U verändert werden (vgl. Abb. 15.13.). Der Spannungsteiler wird auch als Potentiometer bezeichnet. Mit seiner Hilfe stellt man aus einer gegebenen Spannung veränderliche Teilspannungen her.

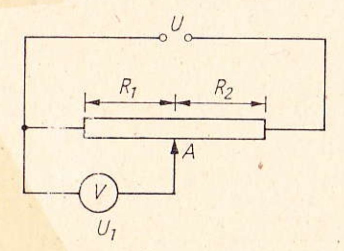


Abb. 15.13. Zum Spannungsteiler

15.4.3. Die Erweiterung des Meßbereichs von Meßgeräten

Mit einem Spannungsmeßgerät, das den Widerstand R_M hat und bis zu der Spannung U_M messen kann, soll eine größere Spannung $U > U_M$ gemessen werden. Das bedeutet, daß der Meßbereich des Gerätes erweitert werden muß. Dazu ist ein Vorschaltwiderstand R_V zum Meßgerät erforderlich (vgl. Abb. 15.14.).

Seine Größe ergibt sich aus den Gesetzen für die Reihenschaltung von Widerständen zu:

$$R_V = \frac{R_M(U - U_M)}{U_M}$$

Der maximale Zeigerausschlag zeigt jetzt nicht mehr die Spannung U_M, sondern die größere Spannung U an.
Entsprechend wird der Meßbereich eines Strommeßgerätes durch einen parallelgeschalteten Widerstand R_P erweitert (vgl. Abb. 15.15.). Es gilt:

$$R_P = \frac{I_M \cdot R_M}{I - I_M}$$

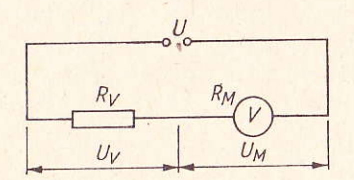


Abb. 15.14. Meßbereichserweiterung beim Voltmeter

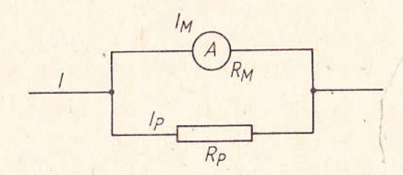


Abb. 15.15. Meßbereichserweiterung beim Amperemeter

Wortliste zum Text

ab/fallen (an D), (um A)
fiel ab, abgefallen (sein)
an/schließen A (an A)
schloß an, angeschlossen
der Ausschlag, ⸚e
die Breite, –n
erfordern A
der Ersatzwiderstand, ⸚e
erweitern A (auf A)
der Gleitkontakt, –e
das Intervall, –e
die Klemme, –n
die Klemmenspannung, –en
die Kombination, –en
konstruieren A
das Kraftfahrzeug, –e
der Kurzschluß, Kurzschlüsse

der Meßbereich, –e
die Nennleistung, –en
das Netz, –e
niederohmig
die Parallelschaltung, –en
das Potentiometer, –
die Reihenschaltung, –en
reziprok
das Schaltbild, –er
der Schnitt, –e
der Skalenendwert, –e
der Spannungsabfall, ⸚e
der Spannungsteiler, –
die Summe, –n
unendlich
die Urspannung, –en
verallgemeinern (A auf A)

veränderlich
verschieben A
verschob, verschoben
der Vorschaltwiderstand, ⸚e
der Zeiger, –

zusammen/fließen
floß zusammen, zusammengeflossen (sein)
zusammen/schalten A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Gleichungen gelten für eine Reihenschaltung von Widerständen, un was bedeuten die darin auftretenden Größen?
2) Welche Wirkung hat der innere Widerstand einer Stromquelle, und wie heißt das *Ohm*sche Gesetz für den gesamten Stromkreis?
3) Was versteht man unter dem Ersatzwiderstand?
4) Welche Gleichungen gelten für eine Parallelschaltung von Widerständen?
5) Wie entsteht eine gemischte Schaltung?
6) Welche Aufgabe hat ein Vorschaltwiderstand?
7) Welche Funktion hat ein Gleitkontakt eines Potentiometers?
8) Wozu verwendet man einen Spannungsteiler?
9) Wie vergrößert man den Meßbereich eines Voltmeters?
10) Wie vergrößert man den Meßbereich eines Amperemeters?

2. Übungen zum Text

2.1. Gesetze der Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

2.1.1. *Schreiben Sie* die Bedeutung der folgenden Gleichungen in Worten!

► In einer Reihenschaltung von Widerständen ist die Summe der Teilspannungen gleich der Gesamtspannung.

(1) $\sum U_k = U$;
(2) $\sum I_k = I$;
(3) $\sum R_k = R$;
(4) $U_i = IR_i$;
(5) $U = E - U_i$;
(6) $\sum \frac{1}{R_k} = \frac{1}{R}$.

2.1.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

Angabe einer Bedingung

Unter welcher Bedingung gilt für einen Stromkreis mit 3 Widerständen, daß

(1) die Stromstärke an allen Stellen gleich groß ist?

(2) an jedem Widerstand die Gesamtspannung anliegt?
(3) für die Gesamtstromstärke gilt: $I = I_1 + I_2 + I_3$?
(4) für die Gesamtspannung gilt: $U = U_1 + U_2 + U_3$?

2.1.3. *Vergleichen Sie* die beiden Stromkreise der Abb. 15.16. und 15.17. in bezug auf

(1) die Geräte und ihre Schaltung
(2) die Größe der Widerstände und die Gesamtstromstärke
(3) die Gesamtspannung!

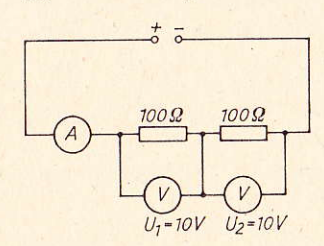


Abb. 15.16.

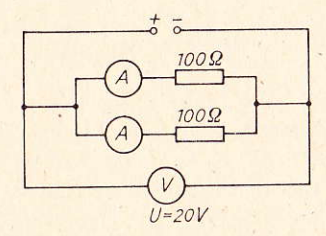


Abb. 15.17.

2.2. Die Definition wichtiger Begriffe

Attributsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe!

(1) Spannungsabfall;
(2) Urspannung;
(3) innerer Spannungsabfall;
(4) Parallelschaltung;
(5) Reihenschaltung;
(6) gemischte Schaltung

2.3. Spannungsabfall

2.3.1. *Bilden Sie entsprechende Sätze!*

ab/fallen an D

► An dem Widerstand fällt eine Spannung von 6 V ab.

(1) Widerstand/6 V
(2) Glühlampe/220 V
(3) Verbraucher/110 V
(4) elektrisches Gerät/24 V

2.3.2. *Bilden Sie entsprechende Sätze!*

ab/fallen an D (um A)/Angabe eines Grundes

► An jedem Widerstand soll die Gesamtspannung um 6 V abfallen.
► Weil die Stromquelle eine Spannung von 24 V hat, muß man vier Widerstände in Reihe schalten.

(1) Widerstände/6 V – Stromquelle 24 V
(2) Widerstände/12 V – Stromquelle 24 V
(3) Widerstände/6 V – Stromquelle 6 V
(4) Glühlampen/220 V – Stromquelle 220 V

2.4. Reihenschaltung, Parallelschaltung und gemischte Schaltung

2.4.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

Angabe einer Bedingung

Unter welcher Bedingung gilt für einen Stromkreis mit 4 gleichgroßen Widerständen, daß

(1) die Gesamtstromstärke $I = I_1 = I_2 + I_3 + I_4$ ist?
(2) die Gesamtstromstärke an allen Stellen gleich groß ist?
(3) die Gesamtstromstärke $I = I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ ist?
(4) die Gesamtspannung $U = U_1 = U_2 + U_3 + U_4$ ist?
(5) die Gesamtspannung an jedem Teilwiderstand anliegt?
(6) die Gesamtspannung $U = U_1 + U_2 = U_3 + U_4$ ist?

2.4.2. *Sprechen Sie* über die Möglichkeiten der Schaltung von Widerständen, die eine Verringerung bzw. Vergrößerung der Gesamtstromstärke zur Folge haben!

2.5. Vorschaltwiderstand und Spannungsteiler

2.5.1. *Bestimmen und begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

Attributsatz und Angabe eines Grundes

► Die Behauptung, daß für den Vorschaltwiderstand die Gesetze der Parallelschaltung gelten, ist falsch, weil der Vorschaltwiderstand in Reihe mit dem Gerät geschaltet ist.

(1) Für den Vorschaltwiderstand gelten die Gesetze der Parallelschaltung.
(2) Je größer der Vorschaltwiderstand ist, desto größer ist der Spannungsabfall an diesem Widerstand.
(3) Der Vorschaltwiderstand verringert die Stromstärke.
(4) Für den Spannungsteiler gelten die Gesetze der Reihenschaltung.
(5) Durch den Gleitkontakt wird die Stromstärke verändert.

2.5.2. *Vergleichen Sie* die beiden Stromkreise in bezug auf

(1) die Geräte und ihre Schaltung!
(2) die Gesetze, die für die Stromkreise gelten!

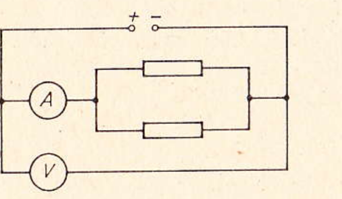


Abb. 15.18.

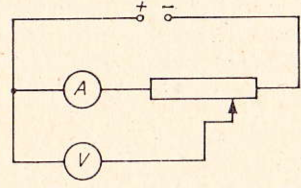


Abb. 15.19.

2.5.3. *Beschreiben Sie* den Aufbau und die Wirkungsweise eines Spannungsteilers!

2.6. Die Erweiterung des Meßbereichs von Meßgeräten

2.6.1. *Leiten Sie* die Gleichung für den Vorschaltwiderstand R_v bei Erweiterung des Meßbereichs eines Voltmeters *her*!
Beachten Sie die Hinweise!

(1) Zeichnen Sie ein Schaltbild zu diesem Problem!
(2) Nennen Sie im Zusammenhang mit diesem Schaltbild die Bedeutung der Größen R_v, R_M, U und U_M!
(3) Nennen Sie die Gesetze, die für diese Schaltung gelten!
(4) Leiten Sie aus diesen Gesetzen eine Gleichung für R_v her!

2.6.2. *Leiten Sie* die Gleichung für den parallelgeschalteten Widerstand bei Erweiterung des Meßbereiches eines Amperemeters *her*!

3. Übungen zum Thema

3.1. Reihen- und Parallelschaltung

3.1.1. *Beschreiben Sie* ein Experiment zur Bestätigung des Gesetzes $U = \sum U_k$!
Beachten Sie die Hinweise!

(1) Zeichnen Sie ein Schaltbild zu diesem Experiment!
(2) Sprechen Sie über den Aufbau der Schaltung!
(3) Sprechen Sie über die Durchführung des Experimentes und das Ergebnis der Messung!

3.1.2. *Beschreiben Sie* ein Experiment zur Bestätigung des Gesetzes $I = \sum I_k$! Beachten Sie die Hinweise der Übung 3.1.1.!

3.1.3. *Beantworten Sie die Fragen!*

Adjektive auf -bar

► Die Stromstärke ist mit einem Amperemeter meßbar.

(1) Mit welchem Gerät kann man die Stromstärke messen?
(2) Womit kann man die Spannung messen?
(3) Wozu kann man einen Vorschaltwiderstand verwenden?
(4) Wozu kann man einen parallelgeschalteten Widerstand verwenden?
(5) Wodurch kann man physikalische Gesetze darstellen?
(6) Wodurch kann man Gesetze nachweisen?

4. Textaufgaben

75. Eine Kleinlampe für 1,5 V und 0,3 A soll an 6 V angeschlossen werden. Welcher Vorschaltwiderstand wird benötigt?

76. Die Widerstände R_1 und R_2 liegen parallelgeschaltet an der Spannung U. Der Gesamtwiderstand ist R, die Gesamtstromstärke I und die Teilstromstärken sind I_1 und I_2. Vervollständigen Sie die Tabelle!

Tabelle 15.1.

	U	R_1	R_2	R	I_1	I_2	I
(1)	6 V	3 Ω	6 Ω				
(2)	220 V					0,454 A	0,796 A
(3)	380 V	20 Ω					38 A
(4)		18 kΩ		10,8 kΩ			23,2 mA
(5)		0,5 Ω			12 A	4 A	

77. 2 Lampen von 484 Ω bzw. 242 Ω liegen parallel an 220 V. Wie groß sind Gesamtwiderstand, Gesamtstromstärke und Teilstromstärken?

78. Schaltet man zu einem Widerstand R_1 den Widerstand R_2 parallel, so beträgt der Gesamtwiderstand $0{,}2\,R_1$. Wie groß ist das Verhältnis $R_1 : R_2$?

79. In Abb. 15.20. ist $U = 10$ V, $I = 210$ mA, $R_1 = 100\,\Omega$, $R_2 = 250\,\Omega$ und $R_3 = 200\,\Omega$. Wie groß ist R_4?

80. Ein gegebenes Meßgerät erreicht den Skalenendwert bei 2 mA, wobei 100 mV am Gerät abfallen. Welche Widerstände sind für die Erweiterung des Meßbereiches auf folgende Skalenendwerte notwendig?
(1) 10 mA, (2) 10 V, (3) 5 A, (4) 50 V, (5) 500 V

81. Wie groß ist jeder der gleich großen Widerstände in Abb. 15.21., wenn der Gesamtwiderstand 660 Ω beträgt?

82. $R_1 = 600\,\Omega$ ist mit R_2 parallelgeschaltet. R_2 ist variabel von 0 bis 1 200 Ω. Stellen Sie die Abhängigkeit des Gesamtwiderstandes R von R_2 grafisch dar!

83. Wie groß ist der Gesamtwiderstand der Schaltung nach Abb. 15.22.?

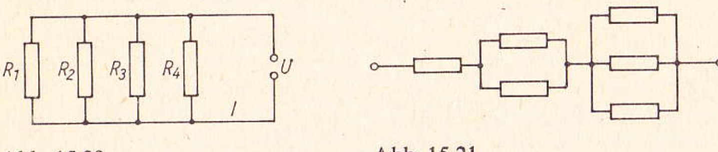


Abb. 15.20. Abb. 15.21.

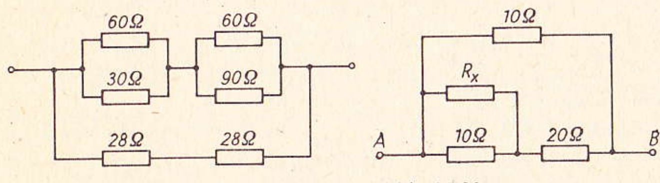


Abb. 15.22. Abb. 15.23.

84. Eine Stromquelle hat eine Urspannung von 15 V und einen inneren Widerstand von 3 Ω. 5 Glühlampen zu je 8 Ω werden in Reihe an sie angeschlossen. Wie groß ist der Spannungsabfall an einer Glühlampe?

85. Der Akkumulator eines Kraftfahrzeuges hat eine Urspannung von 12 V. Wenn 2 Lampen zu je 36 W und 4 Lampen zu je 6 W Nennleistung bei 12 V eingeschaltet werden, beträgt die Klemmenspannung 11,43 V. (1) Welche Klemmenspannung ergibt sich, wenn noch zwei Lampen zu je 36 W Nennleistung eingeschaltet werden? (2) Welchen Kurzschlußstrom kann der Akkumulator liefern?

***86.** (Vgl. Abb. 15.23.). Wie groß muß R_x sein, damit $R_{AB} = 7\,\Omega$ ist? In welchem Intervall ändert sich R_{AB}, wenn R_x von null bis unendlich geändert wird?

87. An einem Motor mit einer Leistung von 25 kW liegt eine Spannung von 450 V. Er ist über eine 250 m lange Doppelleitung aus Kupfer von 4 mm Durchmesser an die Stromquelle angeschlossen. Wieviel % der von der Stromquelle abgegebenen Leistung werden von der Leitung aufgenommen?

***88.** Abb. 15.24. zeigt ein Stück Eisen von 2 mm Dicke mit 5 parallelen Schnitten von vernachlässigbarer Breite in gleichen Abständen. Es bildet einen niederohmigen Widerstand für hohe Stromstärken. (1) Wie groß ist sein Widerstand zwischen A und B? Wie groß sind (2) Stromstärke und (3) Klemmenspannung, wenn der Widerstand an den Akkumulator der Aufgabe 85. angeschlossen wird?

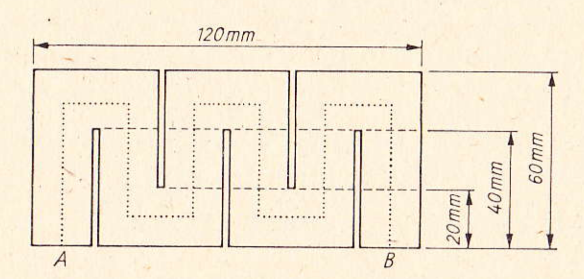


Abb. 15.24.

16. Das elektrische Feld

16.1. Die elektrische Ladung

Elektronen können sich auf einem Körper sammeln und ruhende Ladungen bilden. Das Teilgebiet der Physik, das sich mit dem Verhalten ruhender Ladungen beschäftigt, heißt Elektrostatik.
Wenn man zwei gleichartige Plaststäbe mit einem Tuch reibt und danach das Verhalten der Stäbe untersucht, so stellt man fest, daß zwischen ihnen eine abstoßende Kraft wirkt. Nimmt man aber einen Plaststab und einen Glasstab, so kann man

eine Anziehungskraft feststellen. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Ladungstrennung, die durch das Reiben bewirkt wird.

▶ Gleichartig geladene Körper stoßen sich ab, ungleichartig geladene Körper ziehen sich an.

Durch das Reiben treten Elektronen von dem einen Körper auf den anderen Körper über. Wenn die Stoffe dann schnell getrennt werden, hat der eine Körper einen Elektronenüberschuß. Er ist elektrisch negativ geladen. Auf dem anderen Körper ist ein Elektronenmangel entstanden. Das bedeutet positive Ladung.
Die elektrische Ladung eines makroskopischen Körpers kann als Differenz der Zahl der positiven und negativen Ladungsträger dieses Körpers betrachtet werden. Ladungen sind an Ladungsträger gebunden und können nicht erzeugt und nicht zerstört werden. Deshalb gilt der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung:

▶ Die Summe aller elektrischen Ladungen eines abgeschlossenen Systems ist konstant.

Ein elektrisch geladener Körper kann aber auch ungeladene Körper anziehen (vgl. Abb. 16.1.). Die negative Ladung auf dem Körper A wirkt auf den elektrisch neutralen Körper B. Dadurch entsteht auf B eine Ladungstrennung. Die Ladungstrennung auf einem Körper durch Annäherung einer anderen Ladung nennt man Influenz.

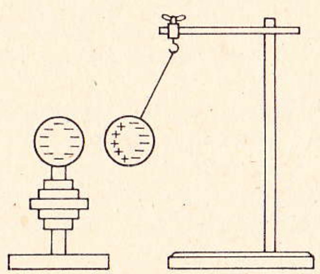


Abb. 16.1. Influenzwirkung

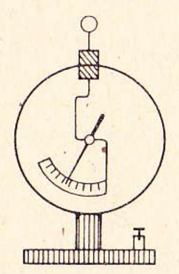


Abb. 16.2. Elektrometer

Kraftwirkungen zwischen elektrischen Ladungen benutzt man bei der Messung von Ladungen mit einem Elektrometer (vgl. Abb. 16.2.). Bringt man elektrische Ladungen auf die Metallkugel dieses Gerätes, so verteilen sie sich auf die mit der Kugel verbundenen Teile. Dadurch wird der Zeiger abgestoßen und gedreht.
Wenn zwei ungleichartig geladene Metallkörper durch einen Leiter verbunden werden, so fließt ein elektrischer Strom. Dabei gleichen sich Elektronenmangel und Elektronenüberschuß aus. Danach sind beide Körper ungeladen oder gleichartig geladen. Die Zahl der Elektronen, die der eine Körper aufnimmt und der andere Körper abgibt, entspricht der übertragenen elektrischen Ladung ΔQ. Sie ist das Produkt aus Stromstärke und Zeit. Ihre Einheit ist 1 Coulomb (C):

elektrische Ladung	$\Delta Q = I \Delta t$	$[Q] = 1\,\mathrm{C} = 1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{s}$

Durch Messungen hat man die Ladung eines Elektrons bestimmt. Sie heißt Elementarladung und beträgt $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C (vgl. Text 12.).
Durch Versuche gelang es *Coulomb*, die Kraft zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern zu bestimmen. Diese Kraft wird als *Coulomb*kraft bezeichnet und im *Coulomb*schen Gesetz ausgedrückt:

*Coulomb*sches Gesetz für das Vakuum	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$

Dabei ist F der Betrag der Kraft zwischen den Ladungen Q_1 und Q_2, r ist der Abstand der Mittelpunkte der geladenen Körper und ε_0 ist die elektrische Feldkonstante. Das Gesetz gilt exakt nur für Kugeln mit gleichmäßiger Ladungsverteilung und für Punktladungen.

16.2. Entstehung und Beschreibung des elektrischen Feldes

Ein elektrisch geladener Körper übt auf andere Körper, die sich in seiner Umgebung befinden, Kräfte aus. Wenn in einem Raum elektrostatische Kraftwirkungen nachgewiesen werden können, so existiert in diesem Raum ein elektrisches Feld. Die Voraussetzung für ein elektrisches Feld ist die Existenz von Ladungsträgern. Eine Ursache für das Entstehen des Feldes ist die Ladungstrennung. Um entgegengesetzte Ladungen zu trennen, muß man eine Arbeit verrichten, d. h., zur Ladungstrennung ist Energie notwendig. Diese Energie wird als potentielle Energie der getrennten Ladungen gespeichert.
Zur Untersuchung des elektrischen Feldes bringt man einen kleinen Körper mit einer kleinen elektrischen Ladung in das Feld. Die auf diese Probeladung wirkende Kraft hat in jedem Punkt des Feldes eine ganz bestimmte Richtung. Nun definiert man Kurven, so daß die Richtung der Tangenten an diese Kurven in einem gegebenen Punkt mit der Richtung der Kraft übereinstimmt (vgl. Abb. 16.3.). Diese Kurven werden als elektrische Feldlinien bezeichnet. Sie dienen als Modell zur qualitativen Beschreibung des elektrischen Feldes. Dabei gilt:

▶ Durch einen Punkt des Feldes verläuft genau eine Feldlinie. Auf der Oberfläche eines Leiters stehen die Feldlinien senkrecht.
Wo der Abstand der Feldlinien am kleinsten ist, ist das Feld am stärksten (vgl. Abb. 16.3. bis 16.6.).

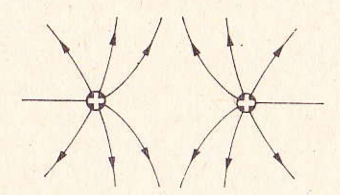


Abb. 16.3. Feldlinien zwischen gleichartig geladenen Körpern

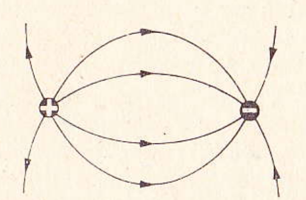


Abb. 16.4. Feldlinien zwischen ungleichartig geladenen Körpern

Bringt man ein flaches Gefäß mit Öl, in dem Grießkörner enthalten sind, in ein genügend starkes elektrisches Feld, so ordnen sich die Grießkörner in einer bestimmten Weise. Dieses Experiment veranschaulicht die elektrischen Feldlinien.

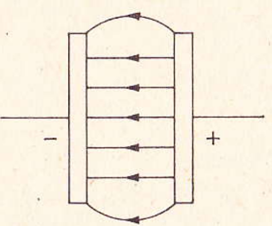


Abb. 16.5. Feldlinien zwischen zwei ungleichartig geladenen Platten

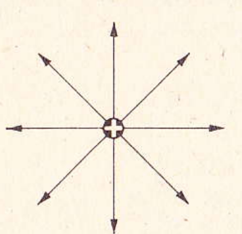


Abb. 16.6. Feldlinien des Radialfeldes einer einzelnen geladenen Kugel

Quantitativ beschreibt man das elektrische Feld durch Feldgrößen, z. B. die elektrische Feldstärke. Wenn sich in einem Punkt eines elektrischen Feldes eine Probeladung q befindet und auf sie durch das elektrische Feld die elektrostatische Kraft $\vec{F}$ wirkt, so ist die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ in diesem Punkt der Quotient aus $\vec{F}$ und q:

elektrische Feldstärke	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	$[E] = 1\,\frac{\text{V}}{\text{m}}$

▶ $\vec{E}$ ist eine vektorielle Größe in Richtung von $\vec{F}$. Ihre Einheit ist $1\,\frac{\text{N}}{\text{C}} = 1\,\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Für das homogene Feld zwischen zwei parallelen Platten gilt $E = \frac{U}{s}$. Dabei ist U die Spannung zwischen den Platten, und s ist ihr Abstand (vgl. Abb. 16.5.).
Die elektrische Feldstärke des Radialfeldes in der Umgebung einer geladenen Kugel (vgl. Abb. 16.6.) erhält man folgendermaßen: Wenn die Kugel die Ladung Q trägt, so wirkt auf eine Probeladung q im Abstand r vom Kugelmittelpunkt nach dem *Coulomb*schen Gesetz die Kraft:

$$F = \frac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,.$$

Die Feldstärke ist allgemein $E = \frac{F}{q}$. Daraus folgt für den genannten Spezialfall:

Feldstärke in der Umgebung einer geladenen Kugel	$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$

Die elektrischen Felder üben Kraftwirkungen auf geladene Körper aus. Man kann

sie physikalisch nachweisen und messen. Damit existieren sie unabhängig von unserem Bewußtsein als Teil der objektiven Realität in Raum und Zeit. Die elektrischen Felder sind deshalb eine Strukturform der Materie.
Eine andere uns bereits bekannte Strukturform ist der Stoff.

Wortliste zum Text

ab/stoßen, (sich) A
stieß ab, abgestoßen
an/ziehen, (sich) A
zog an, angezogen
aus/üben A (auf A)
das Bewußtsein, o.
binden A
band, gebunden
der Blitz, -e
das Elektrometer, -
die Elektrostatik, o.
elektrostatisch
das Feld, -er
die Feldgröße, -n
die Feldlinie, -n
die Feldstärke, -n
flach
gleichartig
der Grieß, o.
das Grießkorn, ¨-er
die Influenz
kugelförmig
die Linie, -n
der Mangel, ¨-
nach/weisen A
wies nach, nachgewiesen
das Öl, -e
der Plast, -e
die Platte, -n
die Probeladung, -en
ruhen
sammeln A
der Spezialfall, ¨-e
die Steckdose, -n
die Strukturform, -en
die Tangente, -n
das Tuch, ¨-er
der Überschuß, Überschüsse
über/treten von D auf A
trat über, übergetreten
das Vakuum, Vakua
vektoriell
verlaufen
verlief, verlaufen (sein)
verteilen A auf A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Womit beschäftigt sich die Elektrostatik?
2) Was versteht man unter positiver bzw. negativer Ladung eines Körpers?
3) Was ist Influenz?
4) Wie ist die Einheit der elektrischen Ladung definiert?
5) Wie lautet das *Coulomb*sche Gesetz, und wie heißen die in ihm auftretenden Größen?

6) Was kann man aus dem Abstand der Feldlinien schließen?
7) Welchen Zweck hat eine Probeladung?
8) Welche Gleichungen für die elektrische Feldstärke sind im Text gegeben?
9) Worin besteht der objektiv reale Charakter der elektrischen Felder?

2. Übungen zum Text

2.1. Die elektrische Ladung

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Ein Körper ist elektrisch negativ geladen, wenn er einen .... hat. Positive Ladung bedeutet .... Ladungstrennung kann durch .... oder .... entstehen. Zur Messung der Ladungen benutzt man ein .... Die Ladung eines Elektrons nennt man ....

Influenz
Elektrometer
Elementarladung
Elektronenmangel
Reiben
Elektronenüberschuß

2.1.2. *Bilden Sie Sätze!*

einander ab/stoßen einander an/ziehen Angabe eines Grundes

► Zwei geladene Plaststäbe stoßen einander ab, weil sie gleichartig geladen sind.

(1) zwei geladene Plaststäbe
(2) ein geladener Plaststab und ein geladener Glasstab
(3) zwei geladene Glasstäbe
(4) ein Elektron und ein Proton
(5) zwei Körper mit Elektronenmangel
(6) zwei Körper mit Elektronenüberschuß

2.1.3. *Definieren Sie die folgenden Begriffe!*

Attributsatz, Konditionalsatz

► Elektronenmangel ist ein Zustand, bei dem der Körper positiv geladen ist.
► Elektronenmangel entsteht, wenn ein Körper Elektronen abgibt.

(1) Elektronenmangel,
(2) Elektronenüberschuß,
(3) Ladungstrennung,
(4) Influenz,
(5) Ladungsausgleich

2.1.4. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

präpositionale Wortgruppe

► Durch das Berühren der Körper kann man Ladungen trennen!

(1) Wodurch kann man Ladungen trennen? (2) Wie kann man Ladungen nachweisen? (3) Unter welcher Bedingung gleichen sich die Ladungen zweier Körper aus? (4) Wie kann man Ladungen messen? (5) Wodurch wird ein Körper negativ geladen?	Elektrometer benutzen Körper berühren zwei Körper reiben Kraftwirkungen messen Elektronenüberschuß erzeugen

2.1.5. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen!

(1) $\Delta Q = I \cdot \Delta t$ (2) $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$

2.1.6. *Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

Angabe eines Grundes

(1) Alle Körper enthalten Ladungsträger.
(2) Alle Körper sind elektrisch geladen.
(3) Es gibt Körper mit einer Ladung $Q = 5/2\, e$.
(4) Durch Influenz entsteht Elektronenmangel.
(5) Ein geladener Körper kann einen ungeladenen Körper anziehen.

2.2. Die Messung von Ladungen

Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Elektrometers!

2.3. Die Entstehung des elektrischen Feldes

2.3.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Was ist die Voraussetzung für ein elektrisches Feld?
(2) Was ist die Ursache für das Entstehen eines elektrischen Feldes?
(3) Was ist zur Ladungstrennung erforderlich?
(4) Wo existiert ein elektrisches Feld?

2.3.2. *Sprechen Sie* über die Entstehung eines elektrischen Feldes! Beachten Sie dabei die Fragen der Übung 2.3.1.!

2.4. Die Beschreibung des elektrischen Feldes

2.4.1. *Beschreiben Sie* das Feldlinienmodell! Beachten Sie die folgenden Hinweise!

(1) Wozu benutzt man das Feldlinienmodell?
(2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Stärke des Feldes und dem Abstand der Feldlinien?
(3) Welche Eigenschaften haben die Feldlinien?

2.4.2. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen!

(1) $E = \frac{F}{q}$ (2) $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$

2.4.3. *Vergleichen Sie* das Feld zwischen zwei Platten und das Radialfeld in bezug auf

(1) den Verlauf der Feldlinien
(2) Richtung und Betrag der Feldstärke!

2.4.4. *Sprechen Sie* über die qualitative und quantitative Beschreibung des elektrischen Feldes! Beachten Sie dabei die Übungen 2.4.1. und 2.4.2.!

3. Übungen zum Thema

3.1. Experimente zum Nachweis der Ladungen und des elektrischen Feldes

3.1.1. *Beschreiben Sie* einfache Experimente, mit denen man die Existenz zweier verschiedenartiger Ladungen nachweisen kann!

3.1.2. *Beschreiben Sie* ein Experiment zur Influenz, und *erklären Sie* die Ladungstrennung durch Influenz!

3.1.3. *Beschreiben Sie* ein Experiment zum Nachweis des elektrischen Feldes!

3.2. Die Einheiten der elektrischen Feldstärke

3.2.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Wovon hängt die Feldstärke eines homogenen Feldes ab, das zwischen zwei parallelen Platten existiert?
(2) Welche Einheit ergibt sich für die Feldstärke aus der Gleichung $E = \frac{U}{s}$?
(3) Durch welche Gleichung ist die elektrische Feldstärke definiert?
(4) Welche Einheit ergibt sich für die Feldstärke aus der Definitionsgleichung?

3.2.2. *Zeigen Sie* die Äquivalenz der beiden Einheiten von E!

3.3. **Das elektrische Feld als Teil der objektiven Realität**

Beantworten Sie die folgenden Fragen!

(1) Was versteht man unter objektiver Realität?
(2) Was sind Existenzformen der objektiven Realität?
(3) Welche Fähigkeit hat das menschliche Bewußtsein?

4. Textaufgaben

89. Zwischen zwei parallelen Platten liegt eine Spannung von 500 V. Welche Feldstärke ergibt sich bei folgenden Plattenabständen?

(1) 1 mm, (2) 2 cm, (3) 4 mm, (4) 0,25 mm und (5) 0,1 mm

90. Vervollständigen Sie die Tabelle!
Betrachten Sie die Felder in den Beispielen als homogen!

Tabelle 16.1.

Beispiel	Abstand d der geladenen Körper	Spannung U	el. Feldstärke E
(1) Blitz	100 m		2000 V mm^{-1}
(2) Steckdose	2 cm	220 V	
(3) Hochspannungsleitung	4500 mm	380 kV	

91. Wieviel Elektronen müssen auf einen neutralen Körper gebracht werden, damit er eine negative Ladung von 1 μC erhält?

92. Eine Kugel von 4 cm Durchmesser mit einer Ladung von 100 nC wird einer Kugel von 10 cm Durchmesser mit 400 nC auf 5 cm genähert. Welche elektrostatische Kraft besteht dann zwischen den Kugeln?

93. Zwischen zwei horizontalen parallelen Platten von 1 mm Abstand befindet sich ein geladenes Teilchen vom Gewicht 10^{-13} N. An den Platten liegt eine Spannung von 208 V mit dem Pluspol an der oberen Platte, so daß das Teilchen weder fällt noch steigt. Ist die Ladung des Teilchens positiv oder negativ, und wieviel Elementarladungen trägt es?

17. Kondensatoren

17.1. Die Kapazität eines Kondensators

Ein Kondensator ist ein Schaltelement, das die Fähigkeit besitzt, beim Anlegen einer Spannung U eine bestimmte Ladungsmenge Q aufzunehmen. Kondensatoren kann man deshalb zum Speichern von Ladungen verwenden. In seiner Grundform besteht ein Kondensator aus zwei Metallplatten (Elektroden), die durch einen Isolator voneinander getrennt sind. Der Isolator zwischen den Platten wird als Dielektrikum bezeichnet (vgl. Abb. 17.1.).

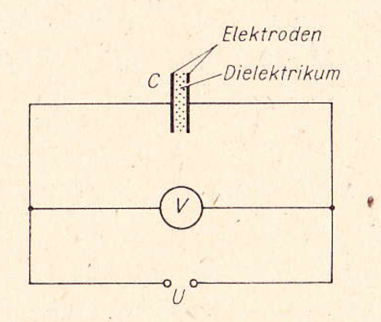


Abb. 17.1. Kondensator

Aus Experimenten erkennt man, daß die vom Kondensator aufgenommene elektrische Ladung Q der Spannung U, die zwischen den Elektroden anliegt, direkt proportional ist:

$$Q \sim U$$

$$\frac{Q}{U} = \text{konstant.}$$

Den Quotienten $\frac{Q}{U}$ bezeichnen wir als die Kapazität C des Kondensators. Ihre Einheit ist 1 Farad (F):

Kapazität eines Kondensators	$C = \frac{Q}{U}$	$[C] = 1\ \text{F} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{V}}$

Andere Einheiten sind das Mikrofarad, μF, das Nanofarad, nF und das Pikofarad, pF.

Die Kapazität eines Kondensators hängt u. a. von der Art des Dielektrikums ab, das sich zwischen den Elektroden befindet. Dabei ist die Kapazität mit Dielektrikum stets größer als die Kapazität im Vakuum. Das Verhältnis der Kapazität C mit

einem Isolator zwischen den Elektroden zur Kapazität C_0 im Vakuum nennt man die relative Dielektrizitätskonstante ε_r des Dielektrikums:

relative Dielektrizitätskonstante	$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$

Die folgende Tabelle gibt einige Beispiele.

Tabelle 17.1. Relative Dielektrizitätskonstanten

Dielektrikum	relative Dielektrizitätskonstante
Luft	1,006
Papier	2
Glas	5
Epsilan*	7000

* keramischer Werkstoff, speziell für die Herstellung von Kondensatoren entwickelt

Wenn die Elektroden parallele ebene Metallplatten in genügend kleinem Abstand sind, so entsteht zwischen ihnen ein homogenes Feld (vgl. Text 16.). In diesem Falle haben wir einen Plattenkondensator.
Es gilt:

Kapazität des Plattenkondensators	$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{s}$

Dabei bedeutet A die Plattenfläche, s den Plattenabstand und ε_0 die elektrische Feldkonstante (Influenzkonstante).

Es ist $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$.

Für praktische Anwendungen in der Elektrotechnik sind viele verschiedene Arten von Kondensatoren mit fester und veränderlicher Kapazität entwickelt worden, z. B. Keramikkondensatoren, Elektrolytkondensatoren und Drehkondensatoren. Werden Kondensatoren der Kapazitäten C_1, C_2, ... C_n parallel geschaltet, so ergibt sich für die Gesamtkapazität

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

Bei Reihenschaltung dieser Kondensatoren gilt

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots \frac{1}{C_n}.$$

17.2. Energie eines geladenen Kondensators

Zwischen den Elektroden eines Kondensators soll ein elektrisches Feld aufgebaut werden. Dazu werden wiederholt kleine Ladungsmengen ΔQ von einer Elektrode zur anderen Elektrode gebracht. Jede Ladungsmenge ΔQ wird dabei gegen die bereits vorhandene Spannung U_i bewegt, und diese Spannung ist proportional zur insgesamt bewegten Ladungsmenge Q. Um die Ladungsmenge ΔQ gegen die Spannung U_i von einer Kondensatorplatte zur anderen zu bringen, muß die elektrische Arbeit $\Delta W_i = U_i \Delta Q$ verrichtet werden. Die gesamte elektrische Arbeit W, die für den Aufbau des elektrischen Feldes zwischen den Platten benötigt wird, ist die Summe aller W_i (vgl. Abb. 17.2.). Sie beträgt

$$W = \tfrac{1}{2}UQ = \tfrac{1}{2}CU^2$$

und ist der vom Kondensator gespeicherten elektrischen Energie äquivalent. Beim Abbau des elektrischen Feldes, d. h. beim Entladen des Kondensators, wird diese Energie wieder frei.

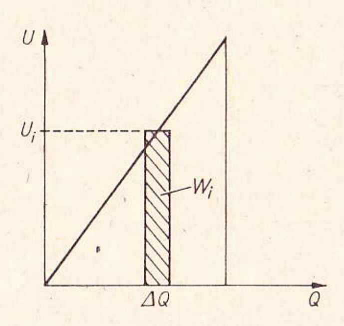


Abb. 17.2. Zur Energie eines Kondensators

Wortliste zum Text

der Abbau, o.
das Bad, ¨-er
das Dielektrikum, Dielektrika
die Dielektrizitätskonstante, -n
der Drehkondensator, -en
die Elektrode, -n
der Elektrolytkondensator, -en
die Elektrotechnik, o.
entladen A
entlud, entladen
das Epsilan, o.
die Fähigkeit, -en
das Farad, - (Einheit)
genügend
die Grundform, -en
halbieren A
die Influenzkonstante, o.
der Isolator, -en
die Kapazität, -en
der Keramikkondensator, -en
der Kondensator, -en
das Nitrobenzen, o.
das Schaltelement, -e
speichern A
verdoppeln A
voneinander

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Woraus besteht ein Kondensator, und welche Aufgabe hat er?
2) Wie ist die Kapazität eines Kondensators definiert?
3) Was versteht man unter der relativen Dielektrizitätskonstanten?
4) Welche Proportionalitäten bestehen zwischen der Kapazität eines Plattenkondensators und der Plattenfläche bzw. dem Plattenabstand?
5) Wie ist die elektrische Feldkonstante am Plattenkondensator definiert?
6) Warum erhält man den Faktor $\frac{1}{2}$ in der Gleichung $W = \frac{1}{2}\, UQ$?

2. Übungen zum Text

2.1. Aufbau und Verwendung von Kondensatoren

2.1.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Woraus besteht ein Kondensator?
(2) Aus welchem Stoff bestehen die Elektroden?
(3) Welche Stoffe kann man als Dielektrikum verwenden?
(4) Wozu kann man den Kondensator verwenden?

2.1.2. *Sprechen Sie* über den Aufbau und die Verwendung eines Kondensators! Beachten Sie dabei die Übung 2.1.1.!

2.2. Die Kapazität eines Kondensators

2.2.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

von Verben abgeleitete Substantive in präpositionalen Wortgruppen

(1) Wozu verwendet man Kondensatoren? (2) Warum kann man mit Kondensatoren Ladungen speichern? (3) Wie kann man durch Änderung der Fläche die Kapazität vergrößern? (4) Wie kann man durch Änderung des Plattenabstandes die Kapazität vergrößern? (5) Wozu verwendet man das Dielektrikum?	durch wegen zu	Fähigkeit, eine Ladungsmenge aufzunehmen Fläche vergrößern Plattenabstand verkleinern Ladungen speichern Kapazität vergrößern

2.2.2. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen!

(1) $C = \frac{Q}{U}$

(2) $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{s}$

(3) $\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$

2.3. Laden und Entladen eines Kondensators

2.3.1. *Vergleichen Sie* die beiden Schaltbilder der Abb. 17.3. und 17.4. in bezug auf

(1) die Geräte und ihre Schaltung
(2) den Vorgang am Kondensator und die Richtung des fließenden Stromes!

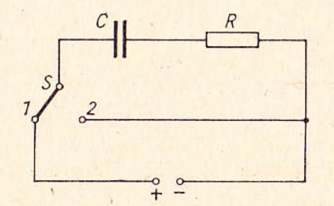


Abb. 17.3.

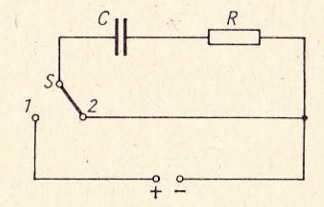


Abb. 17.4.

2.3.2. *Ergänzen Sie den Text!*

laden, entladen

Das elektrische Feld am Kondensator wird stärker, wenn der Kondensator .... wird. Während des .... ist das Feld nicht konstant. Der Kondensator nimmt Ladungen auf, wenn er .... wird. Beim .... gibt er Ladungen ab. Die Stärke des elektrischen Feldes nimmt ab, wenn der Kondensator .... wird.

3. Übungen zum Thema

3.1. Ein Experiment zum Nachweis von $Q \sim U$

Beschreiben Sie ein Experiment zum Nachweis von $Q \sim U$! Beachten Sie die folgenden Hinweise!

(1) Zeichnen Sie zu dem Experiment ein Schaltbild!
(2) Sprechen Sie mit Hilfe des Schaltbildes über die Durchführung und das Ergebnis des Experimentes!

3.2. Kondensatorarten

Sprechen Sie über den Keramik- und den Elektrolytkondensator! Beachten Sie dabei die folgenden Hinweise!

(1) Aus welchen Teilen bestehen die Kondensatoren?
(2) Welche Stoffe bilden das Dielektrikum?

3.3. Der Drehkondensator

Sprechen Sie über Aufbau und Wirkungsweise des Drehkondensators!

3.4. Physikalische Größen, Einheiten und Konstanten

Vervollständigen Sie die Tabellen 17.2. und 17.3.!

Tabelle 17.2. Größen und Einheiten

physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit
Ladung		
	E	
	C	

Tabelle 17.3. Konstanten

Bezeichnung	Zahlenwert
	$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
	$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

3.5. Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

Leiten Sie die Gleichungen für die Gesamtkapazität bei Reihen- und Parallelschaltung *her*! Informieren Sie sich darüber in einem Lehrbuch für Physik!

3.6. Die Energie eines geladenen Kondensators

Leiten Sie die Gleichung $W = \frac{1}{2} UQ$ *her*! Informieren Sie sich darüber in einem Lehrbuch für Physik!

4. Textaufgaben

94. Vervollständigen Sie die Tabelle!

Tabelle 17.4.

Beispiel	Q	U	C
(1) Hochspannungskondensator		2 kV	1 μF
(2) Kleinkondensator	10^{-11} C		100 pF
(3) Blitzkondensator	0,25 C	500 V	
(4) Drehkondensator		1 V	500 pF

95. Ein Plattenkondensator nimmt in Luft bei einer Spannung von 600 V eine Ladungsmenge von 3 pC auf, in einem Ölbad 7,5 pC. Wie groß ist die relative Dielektrizitätskonstante des Öls?

96. In welcher Schaltung können 3 Kondensatoren von je 20 μF bei einer Spannung von 250 V maximale Energie speichern, und wie groß ist diese Energie?

97. Auf welche Spannung muß ein Kondensator von 0,1 μF geladen werden, damit er eine Energie von 3,2 J aufnimmt?

98. Welche Kapazität hat ein Plattenkondensator mit kreisförmigen Platten von 20 cm Durchmesser und 1 mm Abstand, und welche Ladungsmenge nimmt er bei einer Spannung von 500 V auf?
(1) in Luft;
(2) in Nitrobenzen mit $\varepsilon_r = 21{,}5$

99. Ein Drehkondensator besteht aus 11 feststehenden und 10 beweglichen halbkreisförmigen Platten von 6 cm Durchmesser und je 0,5 mm Abstand. Wie groß ist seine maximale Kapazität?

100. Ein Plattenkondensator der Kapazität C_0 nimmt bei der Spannung U_0 die Ladungsmenge Q_0 auf. Welche Spannung, Kapazität, Ladungsmenge und gespeicherte Energie ergeben sich, wenn der Plattenabstand
(1) während der Verbindung mit der Stromquelle,
(2) nach Trennung von der Stromquelle
verdoppelt wird? Welche Wirkung hat die in beiden Fällen verrichtete mechanische Arbeit?

***101.** In den Plattenkondensator aus Aufgabe 98. wird eine Glasplatte von 0,5 mm Dicke gebracht. Welche Kapazität wird dadurch erreicht? (Anleitung: Als Reihenschaltung von 2 Kondensatoren betrachten)

102. Welche Kapazität muß ein Kondensator haben, damit er unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe Energie speichert wie ein 6-V-Akkumulator mit einer Kapazität von $It = 6$ Ah?

18. Das magnetische Feld

18.1. Der Dauermagnetismus

In der Natur gibt es Körper, die Eisen anziehen. Solche Körper nennt man Magneten. Magneten mit großer Anziehungskraft stellt man aus Stahl und anderen Legierungen her. Sie behalten ihren Magnetismus eine längere Zeit und heißen deshalb Dauermagneten. Sie haben verschiedene Formen. Einige Beispiele sind in Abb. 18.1. dargestellt.

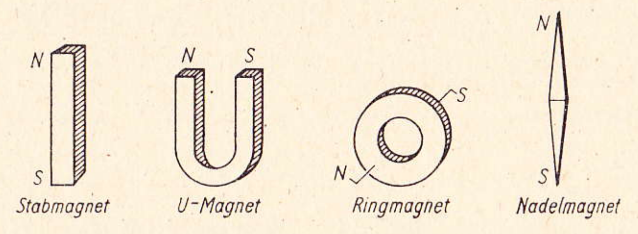


Abb. 18.1. Dauermagneten

Alle Dauermagneten haben gemeinsame Eigenschaften:

▶ Jeder Magnet hat einen Nord- und einen Südpol.
Ein Pol allein existiert nicht.
Ungleichartige Pole ziehen einander an, gleichartige Pole stoßen einander ab.

Wenn in einem Raum magnetische Kraftwirkungen nachgewiesen werden können, so existiert in diesem Raum ein magnetisches Feld. Mit Hilfe der Richtung der Kraft in den Punkten des Feldes werden magnetische Feldlinien definiert, so wie die elektrischen Feldlinien in 16.2. Durch Eisenpulver im Magnetfeld können die magnetischen Feldlinien veranschaulicht werden (vgl. Abb. 18.2.).

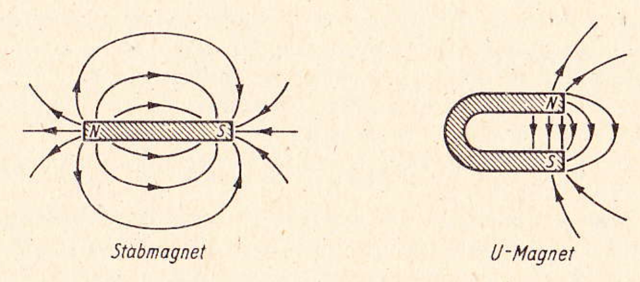


Abb. 18.2. Feldlinien von Dauermagneten

Die Feldlinien haben bestimmte Eigenschaften:

▶ Durch einen Punkt verläuft immer nur eine Feldlinie. Feldlinien schneiden einander nicht.

Außerhalb des Magneten verlaufen die Feldlinien vom Nord- zum Südpol. Diese Richtung ist festgesetzt worden.
Auch mit einem Nadelmagneten kann man ein Magnetfeld nachweisen, weil er sich immer in Richtung der magnetischen Feldlinien einstellt. Wenn man einen Nadelmagneten drehbar aufhängt, so wirkt das Magnetfeld der Erde auf ihn und er stellt sich ungefähr in Nord-Süd-Richtung ein. Diese Eigenschaft benutzt man im Kompaß.
Die Magnetfelder üben Kräfte auf Eisen, auf Magneten und auf stromdurchflossene Leiter aus (vgl. 18.2.3.). Man kann diese Felder nachweisen und messen.

18.2. Der Elektromagnetismus

18.2.1. Der elektrische Strom als Ursache des magnetischen Feldes

Mit einer Versuchsanordnung, wie sie Abb. 18.3. zeigt, wird nachgewiesen, daß ein magnetisches Feld nicht nur in der Umgebung eines Dauermagneten existiert, sondern ebenso in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters. Das wurde zuerst von dem dänischen Physiker *Oersted* festgestellt. Beim Einschalten des elektrischen

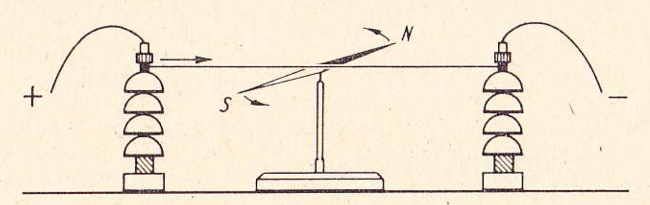


Abb. 18.3. Kraftwirkung in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters

Stromes wird der Nadelmagnet ausgelenkt und stellt sich bei konstanter Stromstärke in eine bestimmte Richtung ein. Das bedeutet, daß sich um den Leiter ein magnetisches Feld aufgebaut hat. Daraus folgt, daß die Bewegung einer elektrischen Ladung die Ursache eines magnetischen Feldes ist. Auch das Magnetfeld eines Dauermagneten wird durch die Bewegung von elektrischen Ladungsträgern erzeugt und zwar in den Atomen des Stoffes, aus dem der Dauermagnet besteht.

18.2.2. Feldlinienbilder

Die Beschreibung eines magnetischen Feldes kann nur auf der Grundlage von Experimenten erfolgen, deren Auswertung uns Vorstellungen von der Form und

Struktur der Felder schafft. Um das Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters nachzuweisen, kann man Eisenpulver benutzen. Die Eisenteilchen bilden konzentrische Kreise um den Leiter und zeigen damit die Form der Feldlinien. Die Richtung der Feldlinien ist bezüglich der Stromrichtung festgelegt worden: Wenn man in die gesetzliche Stromrichtung sieht, so verlaufen die Feldlinien im Uhrzeigersinn um den Leiter (vgl. Abb. 18.4.).

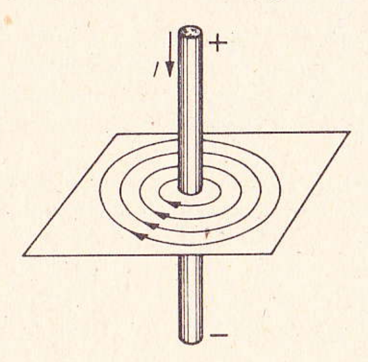
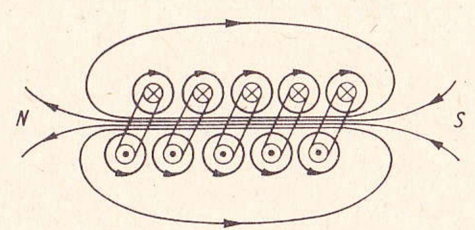


Abb. 18.4. Magnetfeld eines geraden Leiters

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule entsteht durch Überlagerung der Magnetfelder der einzelnen Windungen der Spule. Wenn der Durchmesser der Spule klein gegen ihre Länge ist und wenn die Windungszahl groß genug ist, so ist das Feld im Inneren der Spule praktisch homogen (vgl. Abb. 18.5.). Gerader Leiter und lange Zylinderspule zeigen uns, daß die Feldform vom erzeugenden Leiter abhängt.



⊗ *Stromrichtung in die Bildebene hinein*
⊙ *Stromrichtung aus der Bildebene heraus*

Abb. 18.5. Feld einer langen Zylinderspule

18.2.3. Die magnetische Induktion

Befindet sich ein stromführender Leiter in einem Magnetfeld, so wirkt auf ihn eine Kraft. Das folgt daraus, daß der stromführende Leiter selbst ein Magnetfeld aufbaut, das mit dem bereits vorhandenen Feld zusammenwirkt. Die Kraftwirkung auf einen stromführenden Leiter kann zur quantitativen Beschreibung des Magnetfeldes verwendet werden. Für ein gegebenes homogenes Magnetfeld erhält man experimentell folgende Ergebnisse (vgl. Abb. 18.6.):

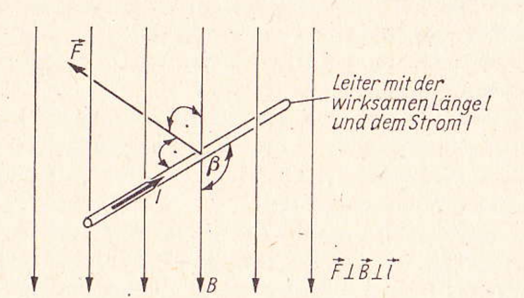


Abb. 18.6. Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld

Die Kraft F auf einen geraden, stromführenden Leiter ist unter sonst gleichen Bedingungen direkt proportional zur Stromstärke I in diesem Leiter:

$$F \sim I.$$

Die Kraft F ist unter sonst gleichen Bedingungen direkt proportional zur wirksamen Länge l des Leiters (das ist die Länge, die sich im Feld befindet):

$$F \sim l.$$

Die Kraft F ist unter sonst gleichen Bedingungen direkt proportional zum Sinus des Winkels β, den der gerade Leiter mit den parallelen Feldlinien des homogenen Feldes bildet:

$$F \sim \sin \beta.$$

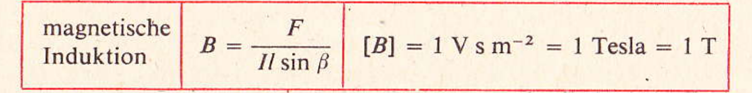
Diese Proportionalitäten faßt man zu $F \sim Il \sin \beta$ zusammen. Weitere Abhängigkeiten lassen sich nicht feststellen. Mit Hilfe eines Faktors B erhält man eine Gleichung. Dabei hängt B nur vom gegebenen magnetischen Feld ab und heißt die magnetische Induktion:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \beta$$

B ist der Betrag einer vektoriellen Größe, die die Richtung und die Intensität des magnetischen Feldes charakterisiert. Die entsprechenden vektoriellen Größen bilden ein vektorielles Produkt:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

Mit $\vec{B}$ ist nun eine Größe definiert, die das magnetische Feld quantitativ beschreibt. Der Betrag B ist die magnetische Induktion:



magnetische Induktion	$B = \dfrac{F}{Il \sin \beta}$	$[B] = 1\ \mathrm{V\,s\,m^{-2}} = 1\ \mathrm{Tesla} = 1\ \mathrm{T}$

$\vec{B}$ bildet mit $\vec{F}$ stets einen Winkel von 90°. β ist der Winkel zwischen $\vec{B}$ und der Richtung des Leiters.
Wenn das untersuchte magnetische Feld inhomogen ist, so hat $\vec{B}$ im allgemeinen in jedem Punkt eine andere Richtung und einen anderen Betrag. In diesem Falle kann kein gerader Leiter zur Bestimmung von $\vec{B}$ verwendet werden, da man dann nur einen Durchschnittswert von $\vec{B}$ erhält.
Bisher haben wir untersucht, welche Wirkung ein Magnetfeld mit der magnetischen Induktion B auf einen stromführenden Leiter hat. Das Magnetfeld kann jedoch auch bezüglich seiner Ursache betrachtet werden. Das ist beim Elektromagnetismus der elektrische Strom in einem Leiter.
Entsprechende Experimente zeigen, daß die Induktion unter sonst gleichen Bedingungen stets proportional zur Stärke I_e des sie erzeugenden Stromes ist. Diesen Strom bezeichnet man als Erregerstrom. Außerdem hängt sie von der Form der Leiter ab. So ist die magnetische Induktion im Inneren einer langen Zylinderspule im Vakuum

$$B = \mu_0 I_e \frac{N}{l}.$$

Dabei ist N die Windungszahl der Spule, und l ist ihre Länge.
$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am ist die magnetische Feldkonstante oder Induktionskonstante. Für die magnetische Induktion in einem Punkt in der Nähe eines geraden Leiters gilt

$$B = \frac{\mu_0 I_e}{2\pi r}.$$

Dabei ist r der Abstand des betrachteten Punktes vom Leiter.
Die magnetische Induktion, die man mit einer Spule erzeugt, kann dadurch erhöht werden, daß die Spule mit Eisen gefüllt wird. Das Eisen bildet den Kern der Spule. Seine relative Permeabilität μ_r ist der Faktor, um den sich die Induktion durch den Kern vergrößert. Die in der Praxis verwendeten Eisenkerne haben eine relative Permeabilität von etwa 7000. Damit erzeugt man die starken Magnetfelder, die in Motoren, Transformatoren und Generatoren gebraucht werden.
Die Kraftwirkung auf einen stromführenden Leiter im Magnetfeld ist die physikalische Grundlage für die Konstruktion von Elektromotoren und elektrischen Meßgeräten.

Wortliste zum Text

auf/bauen A
auf/hängen A
aus/lenken A
außerhalb G
der Dauermagnet, -en
der Dauermagnetismus, o.
drehbar
der Durchschnittswert, -e
ein/stellen A
sich in eine Richtung einstellen
der Eisenkern, -e
der Elektromagnetismus, o.
die Erde, o.
erregen A
die Induktion
die Induktionskonstante, o.
inhomogen
die Intensität
der Kompaß, Kompasse
die Konstruktion, -en
konzentrisch
der Magnet, -en
der Magnetismus, o.
der Nadelmagnet, -en
der Nordpol, -e
die Permeabilität
das Pulver, -
der Ringmagnet, -en
der Rotor, -en
der Sinus, -
die Spule, -n
der Stabmagnet, -en
stromdurchflossen
stromführend
der Südpol, -e
der Transformator, -en
die Überlagerung, -en
der Uhrzeigersinn, o.
der U-Magnet, -en
der Umfang, ⸗e
die Versuchsanordnung, -en
die Windung, -en
die Windungszahl, -en
die Zylinderspule, -n

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Woran erkennt man einen Dauermagneten?
2) Welche Eigenschaften haben die magnetischen Feldlinien?
3) Wie kann man die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes nachweisen?
4) Welche Form haben die magnetischen Feldlinien im Innern einer langen Zylinderspule bzw. in der Umgebung eines geraden Leiters?
5) Wie bestimmt man die Richtung der Feldlinien in der Umgebung eines geraden stromführenden Leiters?
6) Durch welche Wirkung des Magnetfeldes wird die magnetische Induktion B definiert?
7) Welche Gleichung gilt im Vakuum für die magnetische Induktion (1) in einer langen Zylinderspule, (2) in der Umgebung eines geraden Leiters?
8) Welche Beziehung besteht zwischen erzeugter Induktion und der Erregerstromstärke?
9) Was versteht man unter relativer Permeabilität?
10) Wo werden in der Technik starke Magnetfelder gebraucht?

2. Übungen zum Text

2.1. Dauermagnetismus

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

.... sind Körper, die Eisen und andere Stoffe anziehen. Diese Eigenschaft nennt man .... Magneten, die den Magnetismus längere Zeit behalten, nennt man .... Beispiele für Dauermagneten sind der .... und der .... Jeder Magnet hat einen .... und einen .... Ein .... Feld kann man mit .... nachweisen. Mit den .... kann man das magnetische Feld qualitativ beschreiben.	Stabmagnet Magnet Dauermagnet Nadelmagnet Magnetismus Feldlinie Eisenpulver Nordpol Südpol magnetisch

2.1.2. *Sprechen Sie* über den Dauermagnetismus! Beachten Sie die folgenden Hinweise!

(1) Magneten und ihre Eigenschaften,
(2) Beschreibung der Eigenschaften mit Hilfe des Feldlinienmodells,
(3) Möglichkeiten des Nachweises eines Magnetfeldes

2.2. Die qualitative Beschreibung eines Magnetfeldes

Vorgangspassiv

Beantworten Sie die folgenden Fragen im Passiv!

► Eisen wird von Magneten angezogen.

(1) Welche Körper ziehen Eisen an?
(2) Aus welchen Stoffen stellt man Magneten her?
(3) Womit kann man ein Magnetfeld nachweisen?
(4) Wozu verwendet man das Feldlinienmodell?
(5) Was geben die Feldlinien an?
(6) Warum kann man mit einem Nadelmagneten ein Magnetfeld nachweisen?

2.3. Magnetismus

2.3.1. *Definieren Sie die folgenden Begriffe!*

Attributsatz

(1) Magnetismus,
(2) Magnet,
(3) Feldlinienmodell,
(4) Dauermagnet,
(5) Elektromagnet

2.3.2. *Unterscheiden Sie die folgenden Begriffe!*

(1) Dauermagnet und Elektromagnet
(2) Dauermagnetismus und Elektromagnetismus
(3) qualitative und quantitative Beschreibung

2.3.3. *Bestimmen und begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

Attributsatz und Kausalsatz

► Die Behauptung, daß alle Metalle magnetisch sind, ist ..., weil ...

(1) Alle Metalle sind magnetisch.
(2) Durch Teilung eines Stabmagneten erhält man einen Nordpol und einen Südpol.
(3) Alle Magneten bestehen im wesentlichen aus Metall.
(4) Die Ursache des Dauermagnetismus ist die bewegte Ladung.
(5) Ein Eisenkern verstärkt das Magnetfeld einer Spule.
(6) Zur Verstärkung des Magnetfeldes einer Spule kann man auch Aluminium und Kupfer verwenden.

2.4. Die quantitative Beschreibung eines Magnetfeldes

Vorgangspassiv

Beantworten Sie die folgenden Fragen im Passiv!

► $F \sim Il$ kann durch ein Experiment mit Leiter und Dauermagnet bestätigt werden.

(1) Wie kann man $F \sim Il$ bestätigen? (2) Mit welcher Größe kann man die Stärke eines Magnetfeldes beschreiben? (3) In welcher Einheit gibt man die magnetische Induktion B an? (4) Was kann man zur quantitativen Beschreibung eines Magnetfeldes verwenden? (5) Durch welche Gleichung definiert man die magnetische Induktion B?	Experiment mit Leiter und Dauermagnet $B = \frac{F}{I \cdot l \sin \beta}$ Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter magnetische Induktion B $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}}$

2.5. Beschreibung und Nachweis eines Magnetfeldes

beschreiben A (mit D)/nachweisen A (mit D)

Beantworten Sie die Fragen! Verwenden Sie dabei die angegebenen Verben!

(1) Wie kann man prinzipiell ein Magnetfeld beschreiben?
(2) Womit kann man ein Magnetfeld qualitativ beschreiben?

(3) Mit welcher physikalischen Größe beschreibt man das Magnetfeld quantitativ?
(4) Womit kann man ein Magnetfeld nachweisen?
(5) Warum kann man mit einem Nadelmagneten ein Magnetfeld nachweisen?

2.6. Die mathematische Beschreibung des Magnetfeldes

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $B = \frac{F}{Il \sin \beta}$ (2) $B = \mu_0 I_e \frac{N}{l}$ (3) $B = I_e / 2\pi r$

3. Übungen zum Thema

3.1. Elektrisches und magnetisches Feld

3.1.1. *Erläutern Sie die Analogie zwischen der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Induktion*, indem Sie die folgenden Fragen beantworten!

(1) Wie lauten die Definitionsgleichungen für E und B?
(2) Welche Bedeutung haben die in den Definitionsgleichungen auftretenden Größen?
(3) Wie lautet die Gleichung für E in einem Radialfeld und welche Bedeutung haben die auftretenden Größen?
(4) Welche Gleichung für B gilt im Innern einer langen Zylinderspule und welche Bedeutung haben die auftretenden Größen?

3.1.2. *Vergleichen Sie* das elektrische und das magnetische Feld, indem Sie die Tabelle 18.1. ausfüllen und dann darüber sprechen!

Tabelle 18.1.

	elektrisches Feld	magnetisches Feld
Ursache		
Feldgröße		
Richtung der Kräfte und Feldgrößen		
Feldkonstante		
Einfluß des Feldes auf einen Stoff		
stoffspezifische Feldgröße		

3.2. Ein Experiment zur Bestimmung der Form des Magnetfeldes eines geraden stromdurchflossenen Leiters

Beschreiben Sie ein Experiment, mit dem man die Form des Magnetfeldes eines geraden Leiters bestimmen kann! Beachten Sie die folgenden Hinweise und Abb. 18.3.!

(1) Was ist bereits vor dem Versuch bekannt (Vorkenntnisse)? (Zusammenhang zwischen Strom und magnetischer Wirkung; Eigenschaften und Verwendung eines Nadelmagneten)
(2) Worin besteht das Ziel des Experimentes?
(3) Welche Geräte braucht man für diesen Versuch?
(4) Welche einzelnen Beobachtungen können bei dem Versuch gemacht werden?
(5) Welche Schlußfolgerungen kann man aus der Versuchsdurchführung und den Beobachtungen ziehen?

3.3. Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

Beschreiben Sie ein Experiment zum Nachweis der Kraftwirkungen auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eines Dauermagneten! Beachten Sie die Hinweise!

(1) Wovon hängt die magnetische Induktion B bei diesem Versuch ab?
(2) Welche Richtung haben $\vec{B}$ und der Leiter?
(3) Welcher Zusammenhang besteht zwischen $\vec{F}$, $\vec{B}$ und I (Betrag und Richtung)?

4. Textaufgaben

103. Die gegebenen Werte gelten für lange Zylinderspulen mit Eisenkern. Vervollständigen Sie die Tabelle!

Tabelle 18.2.

	I_e	N	l	B	μ_r
(1)	0,1 A	1 000	10 cm		2 000
(2)		500	0,2 m	2 T	2 500
(3)	20 mA		80 mm	2,5 T	500

104. Der Eisenkern nach Abb. 18.7. trägt eine Spule mit 500 Windungen, die von 0,1 A durchflossen wird. Dadurch wird im Kern eine Induktion von

1,5 T erzeugt. Wie groß ist die relative Permeabilität des Kerns? (Anleitung: Spulenlänge l durch mittlere Länge der Feldlinien ersetzen).

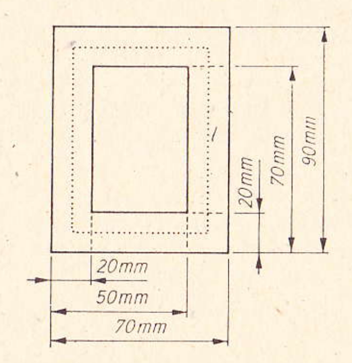


Abb. 18.7.

105. Eine 15 cm lange Zylinderspule mit 850 Windungen aus 0,3 mm dickem Kupferdraht hat einen mittleren Durchmesser von 2 cm. Welche magnetische Induktion wird erzeugt, wenn an der Spule 20 V anliegen?

106. Der Rotor eines Elektromotors ist 0,2 m lang und trägt 100 Windungen. Welche Kraft wirkt am Umfang des Rotors bei einer Stromstärke von 8 A und einer mittleren Induktion von 1 T?

***107.** Zwei lange parallele Leiter werden in der gleichen Richtung von je 1 A durchflossen. Was für eine Kraft wirkt dadurch zwischen ihnen? Wie groß ist sie pro 1 m Länge der Doppelleitung bei einem Abstand der Leiter von (1) 2 mm, (2) 1 m? Was wird vernachlässigt?
(Anleitung: den einen Leiter in dem Magnetfeld betrachten, das vom anderen Leiter erzeugt wird.)

19. Die elektromagnetische Induktion

19.1. Grundversuche zur elektromagnetischen Induktion

Im Text 18. wurde erklärt, daß auf einen stromführenden Leiter im Magnetfeld eine Kraft wirkt, durch die sich der Leiter bewegen kann. Dadurch wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt, wie z. B. in einem Elektromotor. Dieser Prozeß ist umkehrbar. Das bedeutet, daß mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird, wenn man einen Leiter im Magnetfeld bewegt. Dadurch entsteht zwischen den Enden des Leiters eine Spannung, die wir als induzierte Spannung U_{ind} bezeichnen. Abb. 19.1. zeigt, wie dieser Prozeß experimentell beobachtet werden kann. Eine Induktionsspule ist mit einem Spannungsmeßgerät

verbunden. Bewegt man einen Stabmagneten in die Spule, so wird am Voltmeter eine induzierte Spannung angezeigt.

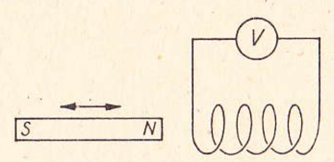


Abb. 19.1. Dauermagnet und Induktionsspule

Ebenso kann der Magnet in Ruhe bleiben und die Spule bewegt werden. Dabei ist auch eingeschlossen, daß die Spule relativ zum Magneten gedreht wird. Als Ursachen der elektromagnetischen Induktion erkennt man daraus
(1) die Änderung der magnetischen Induktion B im Inneren der Spule und
(2) die Änderung der senkrecht zu den magnetischen Feldlinien stehenden wirksamen Querschnittsfläche A der Spule. Man führt für das Produkt AB die Bezeichnung magnetischer Fluß ein:

magnetischer Fluß	$\Phi = AB$	$[\Phi] = 1\ \text{Vs} = 1\ \text{Weber} = 1\ \text{Wb}$

Nun kann definiert werden:

▶ Elektromagnetische Induktion ist ein Prozeß, bei dem durch die Änderung des magnetischen Flusses eine elektrische Spannung erzeugt wird.

Für die Erzeugung einer induzierten Spannung ist nicht unbedingt eine Bewegung notwendig. Mit einer Anordnung wie in Abb. 19.2. wird der magnetische Fluß in der Induktionsspule dadurch geändert, daß man die Stromstärke in der Feldspule ändert, etwa durch Einschalten und Ausschalten des Stromes oder durch Änderung des Widerstandes. Auch dadurch entsteht eine induzierte Spannung.

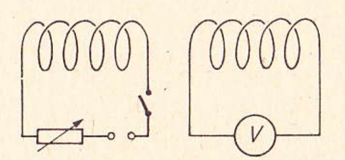


Abb. 19.2. Elektromagnet (Feldspule) und Induktionsspule

19.2. Das Induktionsgesetz

Die elektromagnetische Induktion wird nun quantitativ beschrieben. Die induzierte Spannung ist während der Zeit Δt nachweisbar, in der der magnetische Fluß geändert wird. Die Induktionsvorgänge verlaufen im allgemeinen so schnell, daß

Δt nicht ohne weiteres gemessen werden kann. Deshalb wird das Produkt $U_{ind} \cdot \Delta t$ als Größe für die quantitative Beschreibung von Induktionsvorgängen verwendet. Man bezeichnet es als Spannungsstoß:

Spannungsstoß	$U_{ind} \cdot \Delta t$

Der Spannungsstoß kann mit einem Spannungsmeßgerät gemessen werden, wenn Δt genügend klein ist.
Versuche mit Anordnungen wie in Abb. 19.1. und 19.2. führen zum Induktionsgesetz:

Induktionsgesetz	$U_{ind} \cdot \Delta t = N \cdot \Delta \Phi$

Dabei ist N die Windungszahl der Induktionsspule.
Von den zahlreichen möglichen Methoden der Änderung des magnetischen Flusses sind in der technischen Praxis vor allem zwei von Bedeutung:

(1) In einem Generator wird durch Drehung die wirksame Querschnittsfläche der Induktionsspule geändert.
(2) In einem Transformator wird durch Stromstärkeänderung die magnetische Induktion in der Induktionsspule geändert (vgl. 19.5.).

Aus dem Induktionsgesetz folgt

$$U_{ind} \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Das bedeutet, daß die induzierte Spannung direkt proportional zur Geschwindigkeit der Änderung des magnetischen Flusses ist.

19.3. Das Lenzsche Gesetz

Die induzierte Spannung U_{ind} erzeugt in einem geschlossenen Stromkreis während der Zeit Δt den Induktionsstrom I_{ind}. Damit tritt elektrische Energie $U_{ind} \cdot I_{ind} \cdot \Delta t$ auf, die aus anderen Energiearten entstehen muß. Deshalb muß der Energiesatz auf die elektromagnetische Induktion angewendet werden. Dazu betrachten wir ein Beispiel, wie es in Abb. 19.3. dargestellt ist. Bei Annäherung des Stabmagneten an

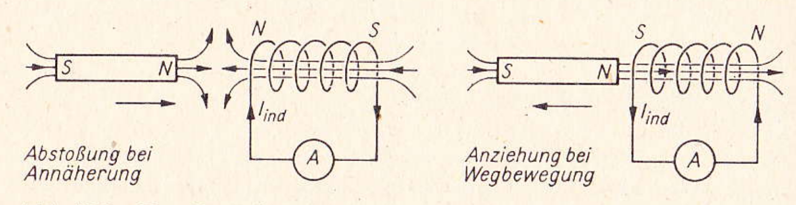


Abb. 19.3. Zum *Lenz*schen Gesetz

die Spule wird ein Strom induziert, und zwar durch die Bewegung des Magneten. Die elektrische Energie im Stromkreis muß deshalb aus der mechanischen Energie bei der Bewegung des Magneten entstehen. Das ist nur möglich, wenn bei der Bewegung des Magneten mechanische Arbeit verrichtet wird. Für die Bewegung des Magneten wird deshalb eine Kraft benötigt. Diese Kraft kann nur bei der Überwindung einer magnetischen Abstoßungskraft auftreten. Daraus folgt, daß der induzierte Strom in der Spule so fließt, daß am linken Ende der Spule ein Nordpol entsteht.
Entsprechend muß bei Wegbewegung des Magneten eine Anziehungskraft überwunden werden. Der Induktionsstrom erzeugt links einen Südpol.
Entgegengesetzte Stromrichtung würde ergeben, daß sich der Magnet nach einem kleinen Stoß von selbst immer schneller bewegen würde. Damit würde die Anordnung ein Perpetuum mobile darstellen.
Die Überlegung gilt allgemein für jeden Induktionsvorgang: Stets muß die Induktionswirkung entgegengerichtet zur Induktionsursache sein, damit der Energiesatz erfüllt ist. Diese Tatsache wird im *Lenz*schen Gesetz ausgedrückt:

▶ Die Wirkung der induzierten Spannung ist ihrer Ursache entgegengerichtet.

Das *Lenz*sche Gesetz wird durch ein Minuszeichen im Induktionsgesetz berücksichtigt. Damit wird die Gegenwirkung ausgedrückt:

$$U_{ind} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Es soll noch erwähnt werden, daß wir das *Lenz*sche Gesetz durch eine deduktive Methode erhalten haben. Das bedeutet, daß wir es aus einem bekannten Gesetz, dem Energiesatz, durch theoretische Überlegung abgeleitet haben. In diesem Sinne ist das *Lenz*sche Gesetz als ein spezielles Ergebnis des Energiesatzes zu betrachten. Andere Gesetze werden induktiv entwickelt, indem man vom Experiment ausgeht und die experimentellen Ergebnisse verallgemeinert.

19.4. Die Selbstinduktion

Wenn die Stromstärke in der Feldspule geändert wird (vgl. 19.1.), so wird nicht nur in der Induktionsspule, sondern auch in der Feldspule selbst eine Spannung induziert. Dieser Prozeß wird als Selbstinduktion bezeichnet:

▶ Die Selbstinduktion ist ein Induktionsvorgang, bei dem die Spannung in dem Leiter induziert wird, der auch die Flußänderung erzeugt.

Die Änderung des magnetischen Flusses ist dabei nur durch eine Änderung ΔI der Stromstärke I möglich. Alle anderen Größen sind konstant. Deshalb gilt für die

Flußänderung bei Selbstinduktion

$$\Delta\Phi = k \cdot \Delta I.$$

Damit erhält das Induktionsgesetz die Form

$$U_{\text{ind}} = -Nk \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

N und k faßt man zur Induktivität L der Spule zusammen. Dann ist die Spannung U_{si}, die durch Selbstinduktion entsteht, die Selbstinduktionsspannung:

Selbstinduktionsspannung	$U_{\text{si}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Nach dieser Gleichung kann man die Induktivität einer Spule durch Messung von U_{si}, ΔI und Δt experimentell bestimmen:

Induktivität	$L = \frac{U_{\text{si}} \cdot \Delta t}{\Delta I}$	$[L] = 1\ \text{H}$.

Ihre Einheit ist 1 Henry = 1 H = 1 V s A^{-1}.
Nach 18.2.2. ist die Induktion in einer langen Zylinderspule im Vakuum $B = \mu_0 I \frac{N}{l}$. In diesem Spezialfall erhält man:

Induktivität einer langen Zylinderspule	$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$

Besondere Bedeutung hat die Induktivität einer Spule in einem Wechselstromkreis, in dem sich die Stromstärke periodisch ändert (vgl. 41.3.2.).

19.5. Der Transformator

In einem Experiment nach Abb. 19.2. kann die Stromstärke in der Feldspule periodisch geändert werden. Man erhält dann eine periodische Induktionsspannung in der Induktionsspule. Damit kommt man zum Prinzip des Transformators. Er hat die Aufgabe, die elektrische Energie eines gegebenen Wechselstromes durch elektromagnetische Induktion wieder in Wechselstromenergie, jedoch mit anderen Werten von Stromstärke und Spannung, umzuwandeln.
Im Prinzip besteht der Transformator aus zwei Spulen, die von einem gemeinsamen Eisenkern getragen werden. Der Kern ist geschlossen, so daß die magnetischen Feldlinien überall im Eisen verlaufen, wobei der größtmögliche magnetische Fluß

erzeugt wird. Fließt in der Primärspule (Feldspule) mit der Windungszahl N_1 der veränderliche Strom I_1, so entsteht im Kern der veränderliche magnetische Fluß Φ. (Vgl. Abb. 19.4.) Nach dem Induktionsgesetz liegt dann an der Primärspule die Spannung

$$U_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

und an der Sekundärspule (Induktionsspule) mit der Windungszahl N_2 die Spannung

$$U_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

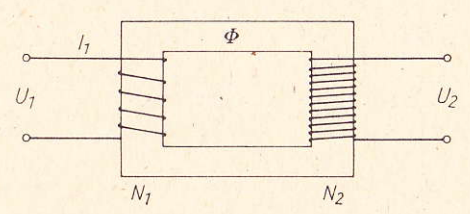


Abb. 19.4. Prinzip eines Transformators

Demnach ist:

Spannungsübersetzung eines Transformators	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$

Diese Gleichung gilt allerdings nur für einen idealen Transformator, bei dem u. a. die Umwandlung von Elektroenergie in Wärmeenergie durch den Widerstand der Spulen vernachlässigt wird. In einem realen Transformator erhält man unter sonst gleichen Bedingungen eine kleinere Sekundärspannung.
Mit Hilfe eines Transformators kann man aus einer gegebenen Wechselspannung kleinere und größere Wechselspannungen für verschiedene praktische Zwecke erzeugen. Großtransformatoren spielen eine wichtige Rolle bei der Elektroenergieversorgung.

Wortliste zum Text

die Annäherung, -en
aus/schalten A
äußern, sich (als N)
berücksichtigen A
die Differentialrechnung, o.
ein/schalten A
elektromagnetisch
entgegengerichtet

der Fluß, Flüsse
gleichmäßig
größtmöglich
das Henry, – (Einheit)
die Induktionsspannung, -en
der Induktionsstrom, ¨-e
induktiv
die Induktivität, -en

induzieren A
die Klingel, -n
die Leiterschleife, -n
das Minuszeichen, -
die Primärspule, -n
die Produktregel, o.
die Sekundärspule, -n
die Selbstinduktion, o.
der Spannungsstoß, ¨-e
vollständig
weg/bewegen (sich) A
zylindrisch

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter elektromagnetischer Induktion?
2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der elektromagnetischen Induktion und der Bewegung eines Leiters im Magnetfeld?
3) Was versteht man unter dem Spannungsstoß, und warum wird er als Maß für den Induktionsvorgang verwendet?
4) Was versteht man unter dem magnetischen Fluß?
5) Formulieren Sie das Induktionsgesetz als Gleichung und in Worten!
6) Was sagt das *Lenz*sche Gesetz, und wie wird es im Induktionsgesetz berücksichtigt?
7) Was versteht man unter Selbstinduktion?
8) Wie ist die Induktivität einer Spule definiert, welche Einheit hat sie, und wie ist diese Einheit definiert?
9) Welche Gleichung gilt für die Induktivität einer langen Zylinderspule im Vakuum?
10) Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem *Lenz*schen Gesetz und dem Energieerhaltungsgesetz?
11) Welche Aufgabe hat ein Transformator?
12) Wie berechnet man die Sekundärspannung eines Transformators?

2. Übungen zum Text

2.1. Wichtige Begriffe

Bilden Sie aus den folgenden Wörtern zusammengesetzte Substantive mit „Induktion“!

zusammengesetzte Substantive

► Induktionsspannung

Induktion/Spannung, Strom, Gesetz, Prozeß, Spule, Versuch

Sprechen Sie über die Bedeutung des neuen Begriffs!

2.2. Grundversuche zur elektromagnetischen Induktion

2.2.1. *Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

Vorgangs- und Zustandspassiv, Kausalsatz

(1) In der Induktionsspule wird eine Spannung induziert, wenn der Stromkreis der Feldspule geschlossen ist.
(2) In der Induktionsspule wird eine Spannung induziert, wenn der Stromkreis der Feldspule geöffnet wird.
(3) In der Induktionsspule wird eine Spannung induziert, wenn der Stromkreis der Feldspule geschlossen wird.
(4) In der Induktionsspule wird eine Spannung induziert, wenn der Stromkreis der Feldspule geöffnet ist.
(5) Die magnetische Induktion B ändert sich, wenn der Erregerstrom für das magnetische Feld eingeschaltet ist.
(6) Die magnetische Induktion B ändert sich, wenn der Erregerstrom für das magnetische Feld ausgeschaltet wird.
(7) Die magnetische Induktion B ändert sich, wenn der Erregerstrom für das magnetische Feld eingeschaltet wird.
(8) Die magnetische Induktion B ändert sich, wenn der Erregerstrom für das magnetische Feld ausgeschaltet ist.

2.2.2. *Sprechen Sie* über einen Induktionsversuch mit Spule und Dauermagnet, indem Sie die folgenden Fragen beantworten (vgl. Abb. 19.1.)!

Angabe einer Bedingung und eines Grundes

(1) Unter welcher Bedingung zeigt das Meßgerät einen Ausschlag?
(2) Warum zeigt das Meßgerät bei Relativbewegung zwischen Spule und Dauermagnet einen Ausschlag?
(3) Unter welcher Bedingung wird in der Spule eine Spannung induziert?
(4) Unter welcher Bedingung vergrößert sich die induzierte Spannung?
(5) Warum vergrößert sich bei schnellerer Bewegung die induzierte Spannung?

2.2.3. *Beschreiben Sie* einen Induktionsversuch mit Feld- und Induktionsspule (vgl. Abb. 19.2.)! Beachten Sie die Hinweise!

(1) Zeichnen Sie ein Schaltbild zu dem Experiment, und bezeichnen Sie die Geräte!
(2) Nennen Sie alle Möglichkeiten, bei denen in der Induktionsspule eine Spannung induziert wird!
(3) Begründen Sie mit Hilfe der Änderung von I bzw. B den Induktionsprozeß!

2.3. Die mathematische Beschreibung der elektromagnetischen Induktion

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $U_{ind} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (3) $L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$

(2) $U_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

2.4. Induktionsprozeß unter verschiedenen Bedingungen

Vorgangspassiv

Beantworten Sie die folgenden Fragen im Passiv!

(1) Was geschieht, wenn man den magnetischen Fluß ändert?
(2) Ändert sich A oder B, wenn man eine Leiterschleife in einen Raum mit konstantem homogenen Feld hineinbewegt?
(3) Ändert sich A oder B, wenn man eine Leiterschleife in einem Raum mit homogenem Feld bewegt?
(4) Ändert sich A oder B, wenn man eine Leiterschleife in einem Raum mit konstantem Feld dreht?
(5) Bei welcher Bewegung der Leiterschleife in einem Raum mit konstantem homogenen Feld wird keine Spannung induziert?
(6) Was geschieht, wenn man die Stärke des Erregerstromes des magnetischen Feldes ändert?

3. Übungen zum Thema

3.1. Das Lenzsche Gesetz

3.1.1. *Beschreiben Sie* ein Experiment, aus dem man auf die Richtung des Induktionsstromes schließen kann!
Begründen Sie die Richtung des Induktionsstromes mit Hilfe des Energieerhaltungsgesetzes!

3.1.2. *Sprechen Sie* über die deduktive Methode am Beispiel des *Lenz*schen Gesetzes! Beachten Sie die Hinweise!

Ausgangspunkt – Frage nach der Richtung des Induktionsstromes

Vorkenntnisse
- Bewegung eines Leiters im Magnetfeld, wenn eine Kraft ($\vec{F}_1$) wirkt
- Bewegung bzw. Kraft ($\vec{F}_1$) ist die Ursache des Induktionsstromes
- Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld (Kraft $\vec{F}_2$)
- Richtung von $\vec{F}_2$ hängt von der Richtung des Induktionsstromes ab

Theoretische Operationen – es gibt zwei Möglichkeiten für die Richtung von $\vec{F}_2$: $\vec{F}_2 \uparrow\uparrow \vec{F}_1$ oder $\vec{F}_2 \uparrow\downarrow \vec{F}_1$.

deduktiver Schluß – es gilt der Energieerhaltungssatz, daraus folgt $\vec{F}_2 \uparrow\downarrow \vec{F}_1$. ($\vec{F}_2 \uparrow\uparrow \vec{F}_1$ bedeutet, daß es ein Perpetuum mobile gibt – Widerspruch zum Energieerhaltungssatz)

Prüfen des Wahrheitswertes am Experiment

3.2. Die Selbstinduktion und das Lenzsche Gesetz

Die Schaltbilder der Abb. 19.5. und 19.6. zeigen den Versuchsaufbau von zwei Experimenten zur Selbstinduktion.

Beschreiben Sie die Experimente, und erklären Sie ihr Ergebnis!

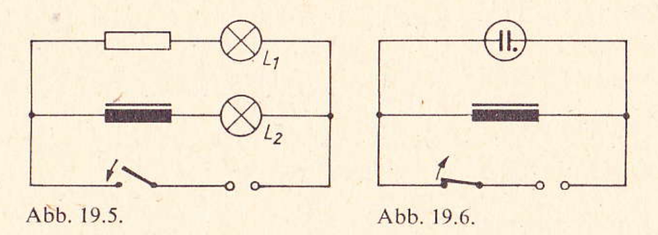


Abb. 19.5. Abb. 19.6.

3.3. Anwendungen der elektromagnetischen Induktion

Unterscheiden Sie Transformator und Generator in bezug auf die Ursache der Änderung des magnetischen Flusses!

3.4. Beispiele für Energieumwandlungen

Vorgangspassiv

Beantworten Sie die folgenden Fragen im Passiv!

(1) Welche Energieumwandlung findet beim *Joule*schen Experiment statt? Durch welche technischen Beispiele wird die Umkehrbarkeit dieser Energieumwandlung bestätigt?
(2) Welche Energieumwandlung findet statt, wenn ein stromdurchflossener Leiter durch die Wirkung eines Magnetfeldes bewegt wird? Wie kann man mit Hilfe eines Leiters im Magnetfeld die Umkehrbarkeit dieser Energieumwandlung zeigen?
(3) Welche Energiearten werden im Elektromotor ineinander umgewandelt?
(4) Welche Energiearten werden in Generatoren ineinander umgewandelt?

3.5. Verschiedene Bedeutungen von ‚Induktion'

Beantworten Sie die Fragen!

Was versteht man unter
(1) Induktion in bezug auf Denkprozesse?
(2) magnetischer Induktion B?
(3) elektromagnetischer Induktion?

4. Textaufgaben

108. Die Angaben gelten für ideale Transformatoren. Vervollständigen Sie die Tabelle!

Tabelle 19.1.

Beispiel	U_1	N_1	U_2	N_2
(1) Klingeltransformator	220 V	1 000	8 V	
(2) Energieversorgung	10 kV	2000		44
(3) Röntgentransformator	380 V		150 kV	30000
(4) Ladetransformator	220 V	1 000		55

109. Wie groß ist die Induktivität einer Spule, wenn in ihr durch eine gleichmäßige Änderung der Stromstärke von 4,9 A auf 1,2 A in 0,6 s eine Spannung von 1,6 V induziert wird?

110. Die Induktivität einer zylindrischen Luftspule soll 50 mH betragen. Die Spule ist 12 cm lang und hat einen Durchmesser von 1,2 cm. Wieviel Windungen muß sie haben?

111. Ein Pol eines langen Stabmagneten wird in 1 s gleichmäßig und vollständig durch eine Spule von 1 500 Windungen geführt, wobei in der Spule 75 mV induziert werden. Welcher magnetische Fluß besteht an diesem Pol?

112. In einer zylindrischen Feldspule mit 2000 Windungen und 10 cm Länge befindet sich eine Induktionsspule mit 300 Windungen und 8 cm^2 Querschnittsfläche.
(1) Welche Spannung wird in der Induktionsspule induziert, wenn die Stromstärke in der Feldspule in 0,1 s gleichmäßig von 0 auf 5 A gestellt wird?
(2) Welcher Spannungsstoß wird induziert, wenn die Stromstärke von 5 A abgeschaltet wird?

***113.** Wenn sich ein gerader Leiter der Länge l mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld der konstanten Induktion B senkrecht zu den Feldlinien bewegt, so wird in ihm die Spannung $U_{ind} = Blv$ induziert. Leiten Sie diese Gleichung her! (Anleitung: große Leiterschleife der Breite l betrachten, die mit Geschwindigkeit v in das Feld geschoben wird.)

114. (vgl. Aufgabe 113.) Der Rotor eines Generators hat eine Länge von 0,5 m und einen Durchmesser von 1 m. Er läuft mit 1 500 Umdrehungen pro Minute und trägt 50 Windungen. Welche Spannung erzeugt er bei einer mittleren Induktion von 0,5 T?

***115.** Ein gerader Leiter wird unter einem Winkel von 90° zu den Feldlinien in ein homogenes Feld der Induktion B bewegt. Wenden Sie darauf den Energiesatz an, und leiten Sie so das Induktionsgesetz für eine Windung bei Induktion durch mechanische Bewegung her!

Zusammenfassende Übungen zur Elektrik

Zur Grammatik

1. **Angabe einer Bedingung**

1.1. **Zusammenstellung der Grammatik**

Die Frage nach einer Bedingung ist „**Unter welcher Bedingung**"?

► Unter welcher Bedingung sind Stromstärke und Spannung direkt proportional?

Die Angabe einer Bedingung kann erfolgen

(1) durch einen Konditionalsatz mit „**wenn**" oder „**falls**".

► Wenn (falls) die Temperatur konstant bleibt, so sind Stromstärke und Spannung direkt proportional.

(2) durch einen Konditionalsatz **ohne Konjunktion**.

► Bleibt die Temperatur konstant, so sind Stromstärke und Spannung direkt proportional.

(3) durch eine präpositionale Wortgruppe mit der Präposition „**bei**".

► Bei konstanter Temperatur sind Stromstärke und Spannung direkt proportional.

1.2. **Übung**

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!
Verwenden Sie dabei alle angegebenen Möglichkeiten für die Angabe einer Bedingung!

Unter welcher Bedingung

(1) bewegen sich die Ladungsträger geordnet durch einen Leiter?
(2) erfolgt auf einem Körper eine Ladungstrennung?
(3) gleichen sich Ladungen aus?
(4) ist das Magnetfeld im Innern einer Spule homogen?
(5) existiert in der Umgebung eines Leiters ein Magnetfeld?
(6) wird in einem Leiter eine Spannung induziert?
(7) ist die induzierte Spannung groß?
(8) existiert zwischen zwei Elektroden ein homogenes elektrisches Feld?

2. **Angabe eines Mittels, eines Zweckes, einer Bedingung oder eines Grundes durch präpositionale Wortgruppen**

2.1. **Zusammenstellung der Grammatik**

Die präpositionale Wortgruppe bildet eine Möglichkeit,

(1) ein Mittel auszudrücken (vgl. S. 103).

► **Durch** Vergrößerung der Spannung kann man die Stromstärke vergrößern.
► Ladungen kann man **mit Hilfe** eines Elektrometers messen.
► Ladungen kann man **mit** einem Elektrometer messen.

(2) einen Zweck auszudrücken (vgl. S. 102).

► **Zum** Speichern von Ladungen braucht man einen Kondensator.

(3) eine Bedingung auszudrücken (vgl. S. 178).

► **Bei** Verkleinerung des Plattenabstandes vergrößert sich die Kapazität eines Plattenkondensators.

(4) einen Grund auszudrücken (vgl. S. 256).

► **Wegen** der Eigenbewegung der Atome und Moleküle wird die Bewegung der Ladungsträger gehemmt.

2.2. **Übung**

Beantworten Sie die Fragen mit Hilfe von präpositionalen Wortgruppen!

(1) Wodurch kann man die Stromstärke in einem Stromkreis vergrößern? (Spannung vergrößern, Widerstand verkleinern)
(2) Womit kann man Stromstärke und Spannung messen? (Amperemeter, Voltmeter)
(3) Womit kann man Magnetfelder nachweisen? (Eisenpulver, Nadelmagnet)
(4) Wozu verwendet man Generatoren? (Erzeugung von Elektroenergie)
(5) Wozu verwendet man Transformatoren? (Veränderung der Spannung)
(6) Wozu braucht man im Elektromagneten einen Eisenkern? (Erzeugung starker Magnetfelder)
(7) Unter welcher Bedingung vergrößert sich der Widerstand eines Leiters? (Temperatur vergrößern, Querschnitt verkleinern)
(8) Unter welcher Bedingung ändert sich die magnetische Induktion B? (Änderung der Stromstärke)
(9) Unter welcher Bedingung ändert sich der magnetische Fluß? (Änderung von A oder B)
(10) Warum wird bei einer Änderung von I in einer Spule eine Spannung induziert? (Änderung von B)
(11) Warum kann im Generator eine Spannung induziert werden? (Änderung von A)
(12) Warum kann man einen Transformator nicht für Gleichstrom verwenden? (Stromstärke konstant)

3. Vorgangs- und Zustandspassiv

3.1. Zusammenstellung der Grammatik

Durch das Vorgangspassiv wird ein Prozeß ausgedrückt, während das Zustandspassiv das Ergebnis eines Prozesses ausdrückt. Die Formen werden folgendermaßen gebildet:

Vorgangspassiv: **werden** + **Part. II**
► Der Stromkreis wird geschlossen.

Zustandspassiv: **sein** + **Part. II**
► Der Stromkreis ist geschlossen.

3.2. Übungen

3.2.1. *Bestimmen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*
(1) Die objektive Realität ist erkannt.
(2) Die objektive Realität wird vom Menschen erkannt.
(3) Die Feldstärke des elektrischen Feldes am Kondensator ist konstant, wenn der Kondensator geladen wird.
(4) Wenn der Kondensator geladen ist, hat er eine konstante Feldstärke.
(5) Wenn der Stromkreis geschlossen wird, ändert sich die Stromstärke.
(6) Wenn ein Stromkreis geschlossen ist, ändert sich die Stromstärke.

3.2.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!* Verwenden Sie das Passiv!
(1) Warum wird die Bewegung der Ladungsträger gehemmt?
(2) Wie wird im Transformator der magnetische Fluß geändert?
(3) Wie wird im Generator der magnetische Fluß geändert?
(4) Womit kann ein physikalischer Prozeß quantitativ beschrieben werden?
(5) Wodurch können Ladungen getrennt werden?
(6) Womit können Hypothesen bestätigt werden?

3.2.3. *Ergänzen Sie den Text!* Beachten Sie Zustands- und Vorgangspassiv!

Am Kondensator existiert ein elektrisches Feld, wenn der Kondensator ... (laden)
Am Kondensator verschwindet das elektrische Feld, wenn der Kondensator ... (entladen)
An einer Spule entsteht ein Magnetfeld, wenn der Stromkreis ... (schließen)
An einer Spule existiert ein Magnetfeld, wenn der Stromkreis ... (schließen)

Zu Wortschatz und Wortbildung

1. Zusammengesetzte Substantive

1.1. *Bilden Sie aus den folgenden Wörtern zusammengesetzte Substantive mit „Strom"!*

Kreis, gleich, Stärke, Wechsel, Induktion, Quelle, Meßgerät

Sprechen Sie über die Bedeutung der neuen Begriffe!

1.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

Was versteht man unter
Spannungsabfall, Urspannung, Klemmenspannung, Spannungsteiler, Spannungsmeßgerät, Induktionsspannung, Spannungsstoß?

1.3. *Nennen Sie* Beispiele für folgende Begriffe!
Feldgröße, Feldlinie, Ladungsträger, Ladungstrennung

1.4. *Ergänzen Sie den Text!*

In der .... untersucht man ruhende Ladungen. Zur Messung von Ladungen verwendet man ein .... Der .... ist eine Grundlage für die Wirkungsweise der Elektromotoren. In Generatoren wird mechanische Energie in .... umgewandelt. Für die Entwicklung der Industrie ist die .... von großer Bedeutung.

Elektrometer
Elektrotechnik
Elektromagnetismus
Elektrostatik
Elektroenergie

2. Substantive und Adjektive

2.1. *Ordnen Sie den Substantiven entsprechende Adjektive zu,* und sagen Sie, was man unter dem Begriff versteht!

Substantive: Induktion, Wirkung, Größe, Feld, Ladung
Adjektive: vektoriell, homogen, elektromagnetisch, positiv, magnetisch

2.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen* (mehrere Antworten sind möglich)! Verwenden Sie stets entsprechende **Adjektive** auf **-bar**!

► Die Stromstärke ist meßbar.

Was kann man messen? (Stromstärke, Spannung, ...)
Was kann man nachweisen? (Eigenschaften, Fehler, ...)

Was kann man beschreiben? (Prozesse, Zustände, ...)
Was kann man umkehren? (Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie, ...)
Was kann man verschieben? (Ladungen, ...)

3. **Wörter in antonymischer Bedeutung**

3.1. *Nennen Sie* Wörter mit antonymischer Bedeutung zu folgenden Wörtern!
einschalten, laden, (sich) abstoßen, ruhen, induktiv, Variable

3.2. *Ergänzen Sie die Sätze!* Verwenden Sie die Wörter der Übung 3.1.!

(1) Die Stromstärke vergrößert sich, wenn man den Stromkreis ....
Beim .... verringert sich die Stromstärke.

(2) An den Platten eines Kondensators liegt eine Spannung an, wenn der Kondensator .... ist. Die Spannung verschwindet, wenn der Kondensator .... wird.

(3) Gleichartige Ladungen ...., ungleichartige Ladungen ....

(4) Die Ursache des elektrischen Feldes sind .... Ladungen, aber die .... Ladungen sind die Ursache des Magnetfeldes.

(5) Bei der .... Methode geht man vom Allgemeinen zum Speziellen. Bei der .... Methode geht man vom Speziellen zum Allgemeinen.

(6) In der Gleichung $C = \varepsilon_0 \frac{A}{s}$ ist ε_0 eine ...., und die anderen Größen sind ....

4. **Schaltzeichen – Symbole und Bezeichnungen**

Nennen Sie die Bezeichnungen aller Bauelemente in den Schaltungen der Abb. 12.1., 17.1., 19.1., 19.5. und 19.6.!

5. **Ordnen von Begriffen**

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach
physikalischen Größen, Einheiten, Vorgängen und Geräten (bzw. Bauelementen)!

Generator, Spannung, Induktivität, Ampere, Influenz, elektrische Feldstärke, Spule, Ohm, Laden, Kapazität, Voltmeter, Henry, magnetische Induktion, elektromagnetische Induktion, Kondensator, Stromstärke, Coulomb, Ladungstrennung, Elektrometer, Ladung, Widerstand, Magnet

Mechanik

20. Kinematik der Punktmasse

20.1. Grundbegriffe

20.1.1. Bewegung, Bezugssystem, Relativbewegung

Eine der grundlegenden Erscheinungen der materiellen Welt ist die Bewegung, die ganz allgemein Veränderung bedeutet. Sie ist eine Grundeigenschaft der Materie und äußert sich u. a. in der Änderung des Zustandes physikalischer Systeme. Die Physik beschränkt sich demnach auf die Untersuchung, Erklärung und Beschreibung der Bewegungen von stofflichen Körpern und nichtstofflichen Feldern. Die Mechanik ist dabei die Wissenschaft von der einfachsten Form der Bewegung, der zeitlichen Veränderung der Lage der Körper. Innerhalb der Mechanik untersucht die Kinematik die Bewegung der Körper mit Hilfe solcher Begriffe wie Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Zeit, sie berücksichtigt aber nicht die bewegten Massen und die bewegenden Kräfte.
Mechanische Bewegung als Ortsveränderung ist stets relative Bewegung. Das heißt, daß die Bewegung eines Körpers nur in bezug auf einen anderen Körper festgestellt werden kann. Mit diesem anderen Körper denkt man sich ein (dreidimensionales kartesisches) Koordinatensystem fest verbunden, und die Bewegung ist dann die Änderung der Abstände eines Körpers von den Achsen dieses Koordinatensystems, das als Bezugssystem bezeichnet wird. Zum Bezugssystem gehört ein Zeitmaß, das verschiedenen Positionen des bewegten Körpers bestimmte Zeitpunkte eindeutig zuordnet.
Aus der Relativität der Bewegung folgt zweierlei. Erstens gibt es keine absolute Bewegung, denn in einem Raum, in dem sich nur ein Körper befindet, kann eine Bewegung dieses Körpers nicht festgestellt werden, weil es keine Bezugsmöglichkeit gibt. Zweitens gibt es keine absolute Ruhe, denn Körper, die sich in bezug auf einen gegebenen Körper (z. B. die Erde) in Ruhe befinden, sind in bezug auf einen anderen Körper (z. B. die Sonne) in Bewegung. Für die Untersuchung von Bewegungen wird im allgemeinen die Erde als Bezugssystem betrachtet. Die gleiche Bedeutung haben Objekte, die relativ zur Erde in Ruhe sind, z. B. das Labor oder der Experimentiertisch.
Zur Vereinfachung der Beschreibung von Bewegungen verwendet man in der Mechanik solche Modelle wie ‚Punktmasse' und ‚starrer Körper'. Der Begriff ‚Punktmasse' ist eine Idealisierung, die als Modell zur Beschreibung der Bewegung verwendet wird. Er wurde im Abschnitt ‚Kinetische Gastheorie' definiert. Ein starrer Körper ist definiert als ein Körper, dessen Form und Größe konstant sind, sich also bei Bewegung des Körpers nicht ändern.

20.1.2. Translation und Rotation

Die Bewegung eines starren Körpers läßt sich auf zwei Grundformen der Bewegung zurückführen, die Translation und die Rotation. Bei einer Translationsbewegung beschreiben die Punkte eines starren Körpers kongruente Bahnen, d. h., daß jeder Punkt des Körpers in derselben Weise verschoben wird. Die Translation eines starren Körpers kann deshalb durch die Translation einer Punktmasse beschrieben werden.
Die Rotationsbewegung (Drehbewegung) ist die Bewegung eines starren Körpers um eine Drehachse, wobei die Punkte des Körpers sich auf konzentrischen Kreisen bewegen. Der Begriff der Rotation setzt mindestens zwei miteinander verbundene Punktmassen voraus. Eine einzelne Punktmasse kann also nicht rotieren, sondern nur eine Translation ausführen.
Mehrere Translationen und Rotationen können sich zu einer komplizierteren Bewegung zusammensetzen. Das bezeichnet man als die Überlagerung von Bewegungen. Umgekehrt kann eine gegebene Bewegung im allgemeinen in einfachere Teilbewegungen zerlegt werden. Wenn ein Körper (eine Punktmasse) mehrere Bewegungen gleichzeitig ausführt, so überlagern sich diese Teilbewegungen zu einer Gesamtbewegung, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Die Teilbewegungen können in beliebiger Reihenfolge betrachtet werden, obwohl sie gleichzeitig ablaufen.

20.1.3. Kinematische Größen

Zur Beschreibung der Bewegung einer Punktmasse braucht man den Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung. Alle drei Größen sind Funktionen der Zeit und vektorielle Größen. Für die Beträge gelten folgende Beziehungen:

Weg	$s = s(t)$	$[s] = 1\,\mathrm{m}$

s ist der in einer bestimmten Zeit zurückgelegte Weg.

Geschwindigkeit	$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = \dot{s}(t)$	$[v] = 1\,\mathrm{ms^{-1}}$

Die Geschwindigkeit gibt die Änderung des Weges mit der Zeit t an. v kennzeichnet den Bewegungszustand eines Körpers. Neben der Momentangeschwindigkeit ($v = \dot{s}$) verwendet man zur weiteren Vereinfachung in der Technik auch:

Durchschnittsgeschwindigkeit	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	
Beschleunigung	$a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \ddot{s}(t)$	$[a] = 1\,\mathrm{ms^{-2}}$

Die Beschleunigung gibt die Änderung der Geschwindigkeit mit der Zeit an. a kennzeichnet die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers. Für ein bestimmtes Zeitintervall Δt wird zur Vereinfachung des Problems oft auch die Durchschnittsbeschleunigung angegeben:

Durchschnittsbeschleunigung	$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Ist bei einer Bewegung der Betrag der Geschwindigkeit konstant, so nennt man diese Bewegung gleichförmig. Ändert sich der Betrag der Geschwindigkeit, so wird diese Bewegung ungleichförmig genannt. Bei der ungleichförmigen Bewegung unterscheidet man die gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit konstanter Beschleunigung von der ungleichmäßig beschleunigten Bewegung, bei der die Beschleunigung nicht konstant ist.

20.2. Bewegung einer Punktmasse auf einer geraden Bahn

Im folgenden soll die Bewegung einer Punktmasse kinematisch betrachtet werden, d. h., die bewegten Massen und die bei der Bewegung auftretenden Kräfte werden nicht berücksichtigt.

20.2.1. Die gleichförmige Bewegung

Bei der gleichförmigen geradlinigen Bewegung legt die Punktmasse in gleichen Zeiten gleiche Wege längs einer Geraden zurück. Die Geschwindigkeit ist konstant und die Beschleunigung gleich null. Es gilt:

$s(t) = s_0 + v \cdot t$, mit s_0 = Anfangsweg, v = konst.

Durch Differentiation folgt $a = \ddot{s} = 0$.

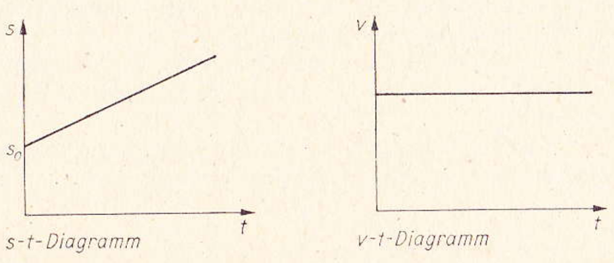


Abb. 20.1. s-t-Diagramm und v-t-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

20.2.2. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist eine Bewegung, bei der die Beschleunigung a konstant ist. Für das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung gilt:

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2$$

Dabei bezeichnet s_0 den Anfangsweg, v_0 die Anfangsgeschwindigkeit, a die Beschleunigung und s den Weg zur Zeit t.
Nach Differentiation ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

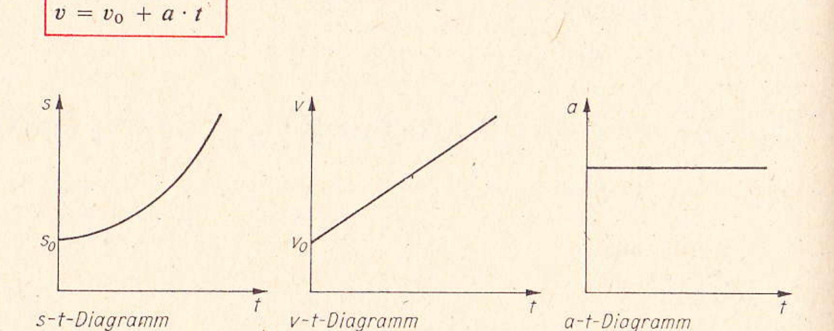


Abb. 20.2. s-t-Diagramm, v-t-Diagramm und a-t-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Nimmt bei einer beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeit zu, so ist die Beschleunigung positiv. Nimmt die Geschwindigkeit ab, so ist die Beschleunigung negativ. Diese Bewegung nennt man eine verzögerte Bewegung.
Ein Beispiel für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist der freie Fall. Man versteht darunter die Bewegung, bei der die Körper im luftleeren Raum frei fallen. Die dabei auftretende Fallbeschleunigung g ist vom Ort abhängig. Der durchschnittliche Wert der Fallbeschleunigung auf der Erde ist $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$. *Galileo Galilei* (1564–1642) untersuchte die Gesetzmäßigkeiten der Fallbewegung und bestätigte sie mit Hilfe von Experimenten. Er gilt als der Begründer der klassischen experimentellen Physik.
Der senkrechte Wurf ist ein Beispiel für eine zusammengesetzte Bewegung. Im folgenden wird ein Beispiel zum senkrechten Wurf berechnet.

Lehrbeispiel:

Ein Körper, der senkrecht nach oben geworfen wird, hat in 20 m Höhe die Geschwindigkeit von 8 m/s. Berechnen Sie die Anfangsgeschwindigkeit und die gesamte Flugzeit bis zur Rückkehr zum Anfangspunkt.

S_1 gegeben:
$s_1 = 20\ \mathrm{m};\ v_1 = 8\ \mathrm{m/s}$
gesucht:
Anfangsgeschwindigkeit v_0
Gesamtzeit t_{2s}

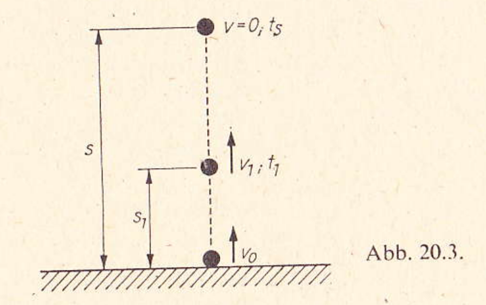


Abb. 20.3.

S_2 (1) $v_1 = v_0 - g \cdot t_1$ und damit $v_0 = v_1 + g \cdot t_1$.

S_3 Für s_1 ergibt sich nach dem Weg-Zeit-Gesetz

$s_1 = v_0 \cdot t_1 - \frac{g}{2} \cdot t_1^2$. Daraus folgt für t_1

(2) $t_1 = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2gs_1}}{g}$.

Setzt man (2) in (1) ein, so folgt für die Anfangsgeschwindigkeit v_0:

$v_0 = \sqrt{v_1^2 + 2gs_1}$.

Außerdem gilt

$v = v_0 + g \cdot t_s$; t_s ist die Zeit für die maximale Steighöhe s.

Da $v = 0$, folgt $t_s = \frac{v_0}{g}$. Dann folgt

$t_{2s} = 2t_s = \frac{2v_0}{g}$ für die Gesamtzeit t_{2s}.

speziell: $v_0 = 21{,}36\ \mathrm{m/s}$ $\quad t_{2s} = 4{,}35\ \mathrm{s}$

Wortliste zum Text

die Achse, -n
die Bahn, -en
eine Bahn beschreiben
beeinflussen A
der Begründer, -
beschleunigen A
die Beschleunigung, -en
beschränken A (auf A)
der Bewegungszustand, ⸚e
die Bezugsmöglichkeit, -en
das Bezugssystem, -e
die Differentiation, -en
die Drehachse, -n
die Drehbewegung, -en
der Durchschnitt, -e
eindeutig
der Experimentiertisch, -e
der freie Fall
die Fallbeschleunigung, -en
geradlinig
gleichförmig
klassisch
klassische Physik
die Kinematik, o.
kinematisch
kongruent
das Labor, -s
die Lage, -n
luftleer
materiell
die Momentangeschwindigkeit, -en
der Ort, -e
die Ortsveränderung, -en
die Rotation, -en
die Rotationsbewegung, -en
rotieren
starr
der starre Körper
die Steighöhe, -n
stofflich
die Translation, -en
die Translationsbewegung, -en
überlagern, sich (mit D)
die Vereinfachung, -en
verzögern A
voraus/setzen A
werfen A
warf, geworfen
der Wurf, ⸚e
zeitlich
das Zeitmaß
zerlegen A (in A)
zu/ordnen D, A
zurück/führen A auf A
zurück/legen A
einen Weg zurücklegen
zusammen/setzen, sich (aus D), (zu D)
zweierlei

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was bedeutet Bewegung allgemein?
2) Welche Formen der Bewegung untersucht die Physik, speziell die Mechanik?
3) Warum ist jede mechanische Bewegung eine Relativbewegung?
4) Was versteht man unter einem Bezugssystem?
5) Warum gibt es keine absolute Bewegung?
6) Definieren Sie den Begriff ‚starrer Körper'!

7) Unter welcher Bedingung sprechen wir von einer Translationsbewegung eines starren Körpers?
8) Was versteht man unter der Rotation eines starren Körpers?
9) In was für Teilbewegungen zerlegt man eine komplizierte Bewegung?
10) Was versteht man unter der kinematischen Betrachtung der Bewegung einer Punktmasse?
11) Welche physikalischen Größen beschreiben den Bewegungszustand einer Punktmasse?
12) Wie ist die Geschwindigkeit eines Körpers definiert?
13) Wie ist die Beschleunigung eines Körpers definiert?
14) Wie nennt man eine Bewegung, bei der der Betrag der Geschwindigkeit konstant bleibt?
15) Unter welcher Bedingung ist eine Bewegung gleichmäßig beschleunigt?
16) Was für eine Bewegung ist der freie Fall?
17) Nennen Sie ein Beispiel für eine zusammengesetzte Bewegung!

2. Übungen zum Text

2.1. Der Bewegungsbegriff

Ergänzen Sie den Text!

Bewegung ist eine Grundeigenschaft der .... Sie bedeutet ganz allgemein .... Die einfachste Form der Bewegung ist die .... Bewegung. Sie ist eine .... Zur Beschreibung einer mechanischen Bewegung braucht man ein .... Eine .... Bewegung gibt es nicht. Oft benutzt man die .... als Bezugssystem. In der Mechanik benutzt man die Modelle .... und ....

Veränderung
mechanisch
Materie
Bezugssystem
Erde
Punktmasse
Ortsveränderung
absolut
starrer Körper

2.2. Arten der Bewegung einer Punktmasse

Attributsatz, Konditionalsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe! Verwenden Sie dabei Attributsätze oder Konditionalsätze!

geradlinige Bewegung

► Eine geradlinige Bewegung ist eine Bewegung, deren Richtung sich nicht ändert.

► Eine Bewegung ist geradlinig, wenn sich ihre Richtung nicht ändert.

(1) gleichförmige Bewegung,
(2) ungleichförmige Bewegung,

(3) beschleunigte Bewegung,
(4) zusammengesetzte Bewegung,
(5) gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

2.3. Kinematische Größen

zusammengesetzte Substantive

Ergänzen Sie den Text!

Mit Hilfe der Größen Weg, Geschwindigkeit und Zeit kann man den .... einer .... beschreiben. Indem man den zurückgelegten Weg durch die benötigte Zeit dividiert, erhält man die .... Zur Berechnung der .... braucht man die erste Ableitung des Weges nach der Zeit. Die .... ist die zweite Ableitung des Weges nach der Zeit. Wenn man die Änderung der Geschwindigkeit durch die dazu benötigte Zeit dividiert, erhält man die .... Die .... und die .... haben die gleiche Einheit.

- Momentangeschwindigkeit
- Durchschnittsgeschwindigkeit
- Durchschnittsbeschleunigung
- Punktmasse
- Bewegungszustand
- Momentanbeschleunigung

2.4. Die Beschreibung der Bewegung einer Punktmasse

Angabe eines Zweckes oder eines Mittels

Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form! Beachten Sie dabei das Fragewort!

(1) Wozu braucht man den Begriff ‚Geschwindigkeit'?
(2) Wie kann man die Momentangeschwindigkeit einer Punktmasse berechnen?
(3) Wodurch kann man Bewegungen graphisch darstellen?
(4) Wozu zerlegt man eine Bewegung in Teilbewegungen?
(5) Womit beschreibt man die Änderung des Weges mit der Zeit?
(6) Wodurch wird die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers gekennzeichnet?

- Bildung der ersten Ableitung des Weges nach der Zeit
- Bewegungsdiagramme
- Beschreibung des Bewegungszustandes
- Geschwindigkeit
- Vereinfachung der Beschreibung
- Beschleunigung

2.5. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

2.5.1. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Unter welcher Bedingung ist eine Bewegung beschleunigt?
(2) Welche Fälle kann man bei einer beschleunigten Bewegung unterscheiden?
(3) Unter welcher Voraussetzung ist eine Bewegung gleichmäßig beschleunigt?
(4) Wie ändert sich die Geschwindigkeit bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung?
(5) Warum ist im s-t-Diagramm der Graph einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung eine Parabel?
(6) Was für eine Bewegung ist der freie Fall?

2.5.2. *Sprechen Sie* zum Thema ‚Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung'! Verwenden Sie dabei die Antworten zu den 6 Fragen!

2.6. Bewegungsdiagramme

Vergleichen Sie die Diagramme der Abb. 20.4. in bezug auf

(1) den dargestellten physikalischen Sachverhalt
(2) die dargestellten physikalischen Größen und
(3) die Form der Graphen!

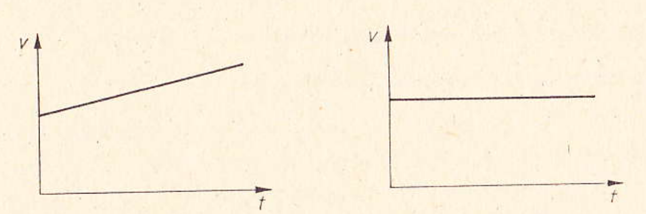


Abb. 20.4.

3. Übungen zum Thema

3.1. Zusammengesetzte Bewegungen

sich zusammen/setzen aus D

Bilden und beantworten Sie Fragen!

► Woraus setzt sich die allgemeine Bewegung eines starren Körpers zusammen?
► Die allgemeine Bewegung eines starren Körpers setzt sich aus Translationen und Rotationen zusammen.
► Aus Translationen und Rotationen.

(1) allgemeine Bewegung des starren Körpers	gleichförmige Bewegung und freier Fall
(2) senkrechter Wurf	Translationen und Rotationen
(3) Bewegung eines Flugzeuges	Eigenbewegung und Bewegung des Wassers
(4) horizontaler Wurf	Eigenbewegung und Bewegung der Luft
(5) Bewegung eines Schwimmers	

3.2. Experimentelle Bestimmung der Fallbeschleunigung g

Die Fallbeschleunigung g kann man experimentell bestimmen. *Beschreiben Sie die Durchführung eines Experiments!*
Beachten Sie dabei folgende Hinweise!

(1) Zum Experiment benötigte Geräte
(Fallkörper, Haltemagnet, Akkumulator, Meterstab, Demonstrationsstoppuhr)
(2) Einschalten des Magneten (Elektromagnet)
(3) Befestigung eines Fallkörpers am Magneten
(4) Messung der Fallhöhe
(5) Ausschalten des Magneten
(6) Ablesung der Fallzeit
(7) Wiederholung des Versuchs
(8) Einschätzung der Fehlerquellen

3.3. Die mathematische Beschreibung der mechanischen Bewegung

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $s = \frac{a}{2}t^2 + v_0t + s_0$ (3) $v = v_0 - at \quad (a > 0)$

(2) $s = \frac{g}{2}t^2$ (4) $v = \sqrt{2as}$

3.4. Der Bewegungsbegriff

Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!

(1) Jede Bewegung ist eine Ortsveränderung.
(2) Jede Bewegung ist eine Veränderung.
(3) Ein Körper kann gleichzeitig verschiedene Bewegungen ausführen.
(4) Ohne Beschleunigung gibt es keine Bewegung.
(5) Jede Geschwindigkeit ist relativ.

3.5. Bewegungsdiagramme

3.5.1. Es sollen Diagramme interpretiert werden. Durch Diagramme werden Zusammenhänge graphisch dargestellt. Die **Interpretation** eines physikalischen Diagrammes muß den dargestellten physikalischen Zusammenhang ver-

deutlichen. Dazu dient die Beantwortung folgender Fragen:
Zwischen welchen physikalischen Größen wird durch das Diagramm ein Zusammenhang dargestellt? Steigt oder fällt die abhängige Größe? Bestehen Proportionalitäten? Welche Funktionsgleichung wird durch das Diagramm dargestellt? Wie ist die physikalische Begründung des dargestellten Zusammenhangs? Unter welcher Bedingung ergibt sich die Funktionskurve des Diagramms?

Interpretieren Sie die folgenden Diagramme!

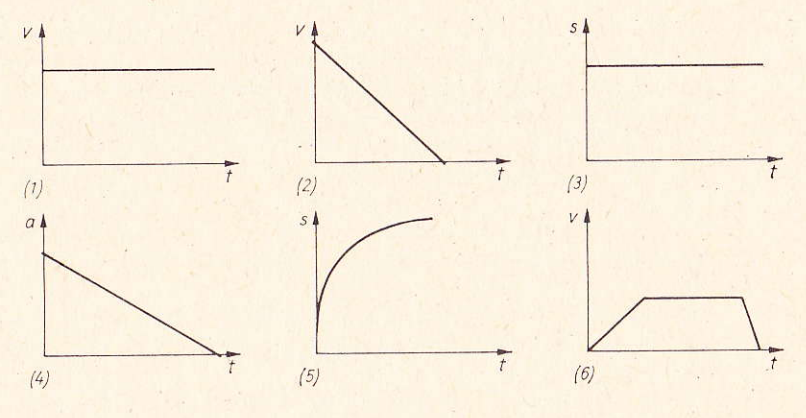


Abb. 20.5.

3.5.2. *Zeichnen Sie* folgende Diagramme!

(1) v-t-Diagramm einer gleichmäßig verzögerten Bewegung
(2) v-t-Diagramm eines ruhenden Körpers
(3) a-t-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung
(4) v-t-Diagramm einer ungleichmäßig verzögerten Bewegung

3.6. Zusammenhang zwischen den kinematischen Größen

Proportionalsatz

Beantworten Sie die folgenden Fragen in der angegebenen grammatischen Form!

► Je größer die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung ist, desto größer ist der pro Zeiteinheit zurückgelegte Weg.

Welcher Zusammenhang besteht
(1) zwischen der Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung und dem pro Zeiteinheit zurückgelegten Weg?
(2) zwischen der Zeitdauer einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung und dem zurückgelegten Weg?
(3) zwischen der Endgeschwindigkeit einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung und dem zurückgelegten Weg?

(4) zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und der für einen bestimmten Weg benötigten Zeit?
(5) zwischen der Beschleunigung einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung und der für einen bestimmten Weg benötigten Zeit?

4. Textaufgaben

116. Ein Kraftwagen legt eine Strecke von 120 km zurück, davon 90 km mit einer Geschwindigkeit $v_1 = 40$ km/h und 30 km mit einer Geschwindigkeit $v_2 = 60$ km/h. Wie lange dauert die Fahrt?

117. Ein Sportler legt eine Strecke von 100 m in 12 s zurück, davon die ersten 20 m gleichmäßig beschleunigt und den Rest mit konstanter Geschwindigkeit. Wie groß sind die erreichte Höchstgeschwindigkeit und die Beschleunigung?

118. Wie groß sind die Anfangsgeschwindigkeit und die Beschleunigung eines gleichmäßig beschleunigt bewegten Körpers, der in der 6. Sekunde 6 m und in der 11. Sekunde 8 m zurücklegt?

119. Ein Straßenbahnwagen braucht zum Anfahren 10 s und erreicht dann eine Geschwindigkeit von 21,6 km/h. 50 m vor der nächsten Haltestelle wird der Wagen gebremst.
Wie groß ist die Beschleunigung beim Anfahren?
Wie lang ist der dazugehörige Weg?
Wie groß sind die Bremszeit und die dabei erzielte Verzögerung?

120. Ein Kraftwagen mit $v_1 = 70$ km/h Geschwindigkeit überholt einen anderen Kraftwagen, der mit einer Geschwindigkeit von $v_2 = 60$ km/h fährt. Jeder Wagen ist 4 m lang. Der Abstand der Wagen beträgt vor und nach dem Überholen 20 m.
Welche Zeit braucht der schnellere Wagen zum Überholen und welchen Weg legt er dabei zurück?

121. Beschreiben Sie den in Abb. 20.6. dargestellten Bewegungsablauf!

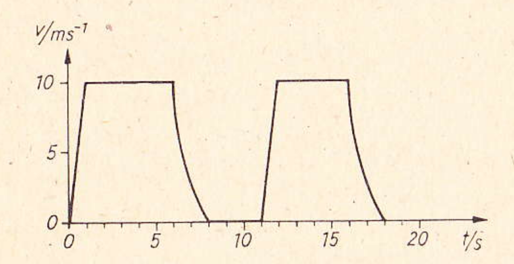


Abb. 20.6.

122. Leiten Sie aus den Bewegungsgleichungen für den freien Fall die Gleichungen für die Fallhöhe $h = f(t)$, die Fallzeit $t = f(h)$ und die Fallgeschwindigkeit $v = f(h)$ her!

***123.** Ein Körper wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 10 m/s senkrecht nach oben geworfen. 1 s später folgt auf der gleichen Bahn ein zweiter Körper mit der Anfangsgeschwindigkeit 15 m/s.
Wann treffen sich die beiden Körper?
Wo treffen sich die beiden Körper?
Welche Bewegungsrichtung haben die beiden Körper am Treffpunkt?

21. Die gleichförmige Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn

21.1. Bahn- und Winkelgeschwindigkeit

Zur Beschreibung einer Kreisbewegung definiert man zwei Geschwindigkeiten:

Bahngeschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$

Dabei ist s der Kreisbogen, und φ ist der Drehwinkel.
Eine Punktmasse bewegt sich gleichförmig auf einer Kreisbahn, wenn in gleichen Zeiten gleiche Wege auf dem Kreis zurückgelegt werden. Der Radius überstreicht dann in gleichen Zeiten gleiche Winkel. Für die gleichförmige Kreisbewegung ergibt sich dann:

Bahngeschwindigkeit	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\varphi \cdot r}{t} = \text{konst.}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi}{t} = \text{konst.}$

s ist der Kreisbogen, φ der Drehwinkel und r der Radius. Aus $s = \varphi r$ folgt durch Differentiation $\frac{ds}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot r$ oder

$$\boxed{v = \omega \cdot r} \quad \text{mit} \quad [\omega] = 1\ s^{-1}.$$

21.2. Die Radialbeschleunigung

Zur Herleitung der Formel für die Radialbeschleunigung zerlegt man die Kreisbewegung einer Punktmasse in zwei geradlinige Bewegungen, deren Richtungen parallel zu den Achsen des Koordinatensystems sind (vgl. Abb. 21.1.).

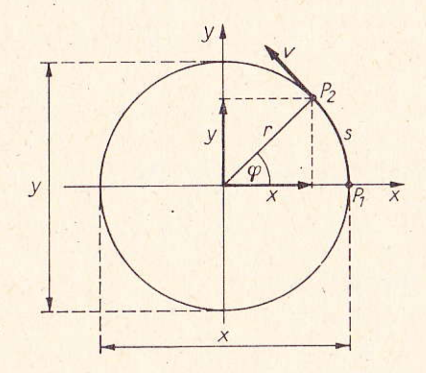


Abb. 21.1. Zur Zerlegung einer Kreisbewegung

Die Lage der Punktmasse wird durch ihren Abstand r vom Koordinatenursprung und den Drehwinkel φ gekennzeichnet. Dann gilt:

$$(1) \quad x = r \cdot \cos\varphi, \quad y = r \cdot \sin\varphi, \quad r^2 = x^2 + y^2.$$

x kennzeichnet die Lage des Punktes bei einer geradlinigen Bewegung in Abszissenrichtung, und y kennzeichnet die Lage des Punktes bei einer geradlinigen Bewegung in Ordinatenrichtung. Beide Bewegungen überlagern sich und ergeben eine Kreisbewegung. Aus den Gleichungen (1) kann man durch Differentiation die Beträge der Geschwindigkeit und der Beschleunigung der gleichförmigen Kreisbewegung ableiten:

$$(2) \quad \dot{x} = -r \cdot \omega \cdot \sin\omega t, \quad \dot{y} = r \cdot \omega \cdot \cos\omega t$$

$\dot{x}$ und $\dot{y}$ sind die Beträge der Geschwindigkeiten in Richtung der beiden Koordinatenachsen.

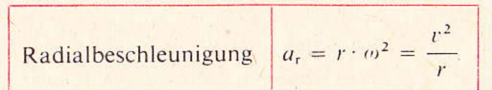
$$(3) \quad \ddot{x} = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos\omega t, \quad \ddot{y} = -r \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega t$$

$\ddot{x}$ und $\ddot{y}$ sind die Beträge der Beschleunigungen in Richtung der beiden Koordinatenachsen (vgl. Abb. 21.2.).
Da bei der gleichförmigen Kreisbewegung der Betrag der Bahngeschwindigkeit konstant ist, wirkt in Richtung von $\vec{v}$ keine Beschleunigung. Daraus folgt, daß die Gesamtbeschleunigung in jedem Punkt der Bahn nur senkrecht zur Richtung von $\vec{v}$ wirken kann.

Aus Abb. 21.2. ergibt sich

$$a = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}$$

und mit Hilfe von (3) die Radialbeschleunigung:



Radialbeschleunigung	$a_r = r \cdot \omega^2 = \dfrac{v^2}{r}$

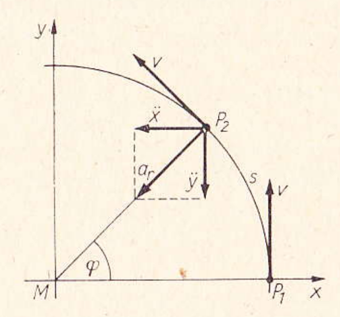


Abb. 21.2. Zur Radialbeschleunigung $\vec{a}_r$

a_r ist der Betrag der Radialbeschleunigung.
$\ddot{x}$ ist der Betrag der Beschleunigung in Richtung der x-Achse.
$\ddot{y}$ ist der Betrag der Beschleunigung in Richtung der y-Achse.

Für die gleichförmige Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn sind die Beträge der Bahngeschwindigkeit, der Winkelgeschwindigkeit und der Radialbeschleunigung konstant. In jedem Punkt der Bahn der Punktmasse ist die Richtung der Geschwindigkeit durch die Tangente an die Bahnkurve gegeben. Die Radialbeschleunigung ist zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet. Die Winkelbeschleunigung $\alpha = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ ist gleich null, weil ω konstant ist.
Die gleichförmige Kreisbewegung ist eine beschleunigte Bewegung, weil sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit ständig ändert.

21.3. Umlaufzeit und Umlaufzahl

Oft verwendet man zur Beschreibung der Kreisbewegung die Umlaufzeit T, das ist die Zeit eines Umlaufs, oder man verwendet die Umlaufzahl n, das ist die Zahl der Umläufe in einer Sekunde.

Umlaufzeit	$T = \dfrac{1}{n}$	$[T] = 1\ \mathrm{s}$

Zwischen der Umlaufzeit T und der Winkelgeschwindigkeit ω besteht die Beziehung

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Lehrbeispiel:

Die Drehzahl eines Motors beträgt $n = 50\ s^{-1}$. Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit des Motors?

S_1 gegeben: Drehzahl $n = 50\ s^{-1}$

gesucht: Winkelgeschwindigkeit ω

S_2 Aus $\omega = \frac{2\pi}{T}$ und $T = \frac{1}{n}$ folgt $\omega = 2\pi n$.

S_3 Für die Winkelgeschwindigkeit ergibt sich dann

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50\ s^{-1} = 314\ s^{-1}$.

Wortliste zum Text

ab/leiten A (aus D)
die Abszisse, –n
die Bahngeschwindigkeit, –en
bevorzugen A
eine Beziehung besteht zwischen D und D
das Bogenmaß
der Drehwinkel, –
die Drehzahl, –en
ergeben A
ergab, ergeben
die Herleitung, –en
die Koordinatenachse, –n
der Koordinatenursprung, o.
die Kreisbahn, –en
die Kreisbahnebene, –n
der Kreisbogen, ̈–
nochmalig
die Ordinate, –n
die Radialbeschleunigung, –en
der Radius, Radien
überstreichen A
überstrich, überstrichen
einen Winkel / eine Fläche überstreichen
die Umfangsgeschwindigkeit, –en
der Umlauf, ̈–e
die Umlaufzahl, –en
die Umlaufzeit, –en
der Winkel, –
die Winkelgeschwindigkeit, –en

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wie ist die Winkelgeschwindigkeit einer gleichförmigen Kreisbewegung definiert?
2) Welche Beziehung gibt es zwischen der Winkelgeschwindigkeit und der Bahngeschwindigkeit bei einer gleichförmigen Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn?
3) In welche Teilbewegungen läßt sich jede Kreisbewegung einer Punktmasse zerlegen?
4) Welchen Betrag und welche Richtung hat die Radialbeschleunigung bei einer gleichförmigen Kreisbewegung?
5) Warum muß die Radialbeschleunigung bei der gleichförmigen Kreisbewegung senkrecht zur Bahngeschwindigkeit gerichtet sein?
6) Warum ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung?
7) Wie sind Umlaufzeit und Umlaufzahl definiert?

2. Übungen zum Text

2.1. Geschwindigkeiten bei der gleichförmigen Kreisbewegung

Ergänzen Sie den Text! Achten Sie darauf, daß einige Wörter mehrfach verwendet werden können!

Wie bei der geradlinigen Bewegung definiert man auch bei der Kreisbewegung eine .... Die .... hat in jedem Punkt die Richtung der Tangente an den Kreis. Sie .... also immer ihre Richtung. Ihr .... bleibt jedoch konstant. Ihre Einheit ist ....
Zur Untersuchung der Änderung des Drehwinkels in Abhängigkeit von der Zeit braucht man die .... Diese Geschwindigkeit gibt es bei der .... Ihre ... . ist $1\ s^{-1}$. Die Winkelgeschwindigkeit ist bei konstantem Bahnradius der .... direkt proportional.

Bahngeschwindigkeit
ändern
Meter pro Sekunde
Kreisbogen
Winkelgeschwindigkeit
Betrag
geradlinige Bewegung
Einheit

2.2. Größen der Kreisbewegung

Attributsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe!
Verwenden Sie dabei Attributsätze!

Drehwinkel

► Der Drehwinkel ist der Winkel, den der Radius r bei der Kreisbewegung überstreicht.

(1) Drehwinkel
(2) Radialbeschleunigung
(3) Bahnradius
(4) Umlaufzeit

2.3. Die Radialbeschleunigung

Angabe eines Grundes

Begründen Sie die folgenden Aussagen!

(1) Ohne Beschleunigung gibt es keine Kreisbewegung.
(2) Bei der gleichförmigen Kreisbewegung hat die Beschleunigung die Richtung des Radius, der die bewegte Punktmasse mit dem Zentrum des Kreises verbindet.
(3) Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ist der Betrag der Radialbeschleunigung konstant.
(4) Die Radialbeschleunigung ändert ständig ihre Richtung.

2.4. Bewegung auf einer Kreisbahn

Attributsatz

Ergänzen Sie die Relativpronomen und die Präpositionen!

Eine Bewegung, ... Richtung sich nicht ändert, ist eine geradlinige Bewegung. Eine Bewegung, bei ..... sich der Körper auf einer Kreisbahn bewegt, heißt Kreisbewegung. Ein Körper, ... Bahngeschwindigkeit dabei dem Betrage nach konstant bleibt, führt eine gleichförmige Kreisbewegung aus. Dazu braucht man eine Beschleunigung, ... ständig zum Zentrum gerichtet ist. Eine Kreisbewegung, ... sich der Betrag der Bahngeschwindigkeit ändert, ist eine beschleunigte Kreisbewegung.

2.5. Zusammenhang von Radialbeschleunigung und Radius

Aus den Gleichungen für die Radialbeschleunigung folgen zwei Proportionalitäten: $a_r \sim r$ und $a_r \sim \frac{1}{r}$

Erörtern Sie, unter welcher Bedingung jede dieser Proportionen gilt, und *zeigen Sie* damit, daß sich diese Proportionen nicht widersprechen!

3. Übungen zum Thema

3.1. Geradlinige Bewegung und Kreisbewegung

Vergleichen Sie die gleichförmige geradlinige Bewegung und die gleichförmige Kreisbewegung in bezug auf

(1) die Bahngeschwindigkeit,
(2) die Beschleunigung,
(3) die zur Beschreibung notwendigen Größen!

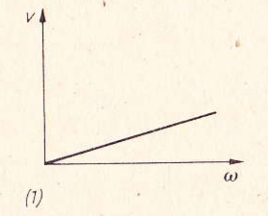
3.2. Bewegungsgleichungen

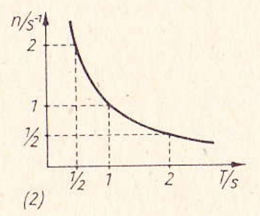
Untersuchen Sie, ob die folgenden Gleichungen für die gleichförmige Kreisbewegung gelten!
(Die Buchstaben haben dabei die in den Texten eingeführten Bedeutungen.)

(1) $s = v \cdot t$
(2) $\varphi = \omega t + \varphi_0$
(3) $v = at + v_0 \quad (a \neq 0)$
(4) $n = k \cdot t \quad (k \neq 0)$

3.3. Bewegungsdiagramme

Interpretieren Sie die folgenden Diagramme!





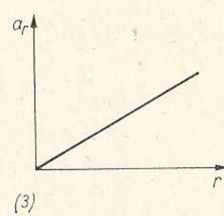


Abb. 21.3.

3.4. Einfache und zusammengesetzte Bewegungen

Ordnen Sie die folgenden Bewegungen nach einfachen Bewegungen und zusammengesetzten Bewegungen!
Nennen Sie bei den zusammengesetzten Bewegungen die Teilbewegungen!

(1) gleichförmige geradlinige Bewegung
(2) freier Fall
(3) Kreisbewegung
(4) senkrechter Wurf
(5) Schwimmer im See
(6) Schwimmer im Fluß

3.5. Die Herleitung der Gleichung für die Radialbeschleunigung

Sprechen Sie in einem Kurzvortrag zum Thema: „Die Herleitung der Gleichung für den Betrag der Radialbeschleunigung a_r“!
Hinweis: Zerlegen Sie die gleichförmige Kreisbewegung in zwei geradlinige Bewegungen, die senkrecht aufeinander stehen! Beachten Sie auch die Übung 2.3.!

3.6. Die beschleunigte Kreisbewegung

Wenn man die Gleichung für die geradlinige Bewegung mit den Gleichungen für die Kreisbewegung vergleicht, stellt man Analogien fest:

$s = v \cdot t$ entspricht $\varphi = \omega \cdot t$

v = konstant entspricht ω = konstant.

Zwischen diesen Größen wird durch den Faktor r der Zusammenhang hergestellt: $v = r \cdot \omega$ und $s = r \cdot \varphi$. *Leiten Sie* durch einen Analogieschluß Gleichungen für eine gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung *her*, deren Winkelbeschleunigung $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ konstant ist!

4. Textaufgaben

124. Eine Punktmasse bewegt sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius r = 2,5 m. In 5 Sekunden legt sie einen Weg s = 3,93 m zurück. Welche Bahn- und Winkelgeschwindigkeit hat die Punktmasse?

125. Eine Punktmasse bewegt sich gleichförmig auf einer Kreisbahn mit dem Radius r.
Vervollständigen Sie die Tabelle!

Tabelle 21.1.

r/m	v/ms^{-1}	ω/s^{-1}	a_r/ms^{-2}
2	1		
	3,5	1,75	
		8	32
0,62			25,8
	4,5		0,75
4		1,5	

126. Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation und die Bahngeschwindigkeit eines Punktes der Erdoberfläche am Äquator und in 52° nördlicher Breite! Der Erdradius beträgt R = 6370 km.

127. Das Rad einer Turbine (Durchmesser 1,80 m) hat eine Umfangsgeschwindigkeit von 225 m/s. Welcher Drehzahl entspricht das?

128. Bei einem Unfall wird das Rad eines Motors zerstört. Ein Teil des Umfangs des Rades (d = 12 cm) wird dabei 65 m nach oben geworfen. Welche Drehzahl hatte der Motor mindestens?

22. Die Kraft und das statische Gleichgewicht

22.1. Die Kraft als physikalische Größe

Der Kraftbegriff ist einer der wichtigsten Begriffe der Mechanik und der gesamten Physik. Bei seiner Definition muß man von den Wirkungen ausgehen, die eine Kraft haben kann. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich die Änderung des Bewegungszustandes und die Änderung der Form eines Körpers. Deshalb definiert man:

► Kräfte sind die Ursachen von Formänderungen und Änderungen des Bewegungszustandes* von Körpern.

Damit ist der Kraftbegriff zunächst qualitativ erfaßt.
Für die quantitative Erfassung von Kräften durch Messung kann man davon ausgehen, daß eine Kraft eine Schraubenfeder verlängert, wenn sie in geeigneter Weise auf sie einwirkt.
Zwei Kräfte sind dann gleich, wenn sie die gleiche Verlängerung einer bestimmten Schraubenfeder verursachen. Außerdem ist die Verlängerung der Schraubenfeder proportional zur Größe der Kraft. Man verwendet deshalb zur Kraftmessung eine Schraubenfeder.

► Die Kraft ist eine physikalische Größe. Sie kann mit einem Federkraftmesser gemessen werden.

Die Einheit der Kraft ist 1 Newton (N). Das Newton wird in einem späteren Abschnitt definiert.
Da eine Kraft stets in einer bestimmten Richtung wirkt, muß sie als vektorielle Größe betrachtet werden. Man stellt sie deshalb als Pfeil dar (vgl. Abb. 22.1.). Die

* Änderung des Bewegungszustandes bedeutet Änderung des Betrages oder der Richtung der Geschwindigkeit.

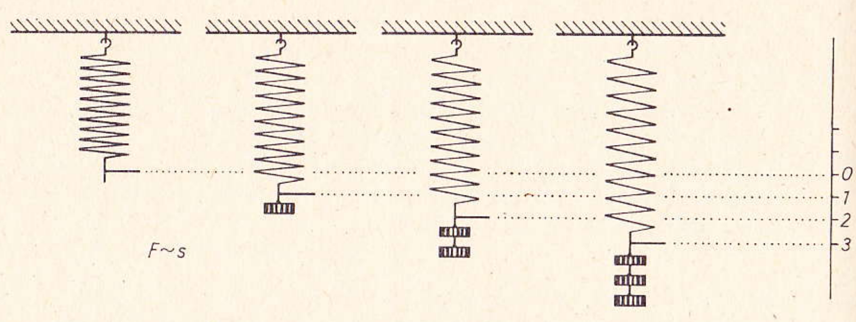


Abb. 22.1. Zur Kraftmessung mit dem Federkraftmesser

Länge des Pfeiles gibt den Betrag der Kraft an, wobei ein bestimmter Maßstab gegeben sein muß. Außerdem erkennt man den Angriffspunkt und die Wirkungslinie der Kraft. Bei starren Körpern darf der Kraftpfeil entlang der Wirkungslinie verschoben werden, weil dann die Kraft eine liniengebundene vektorielle Größe ist (vgl. Abb. 22.2.).

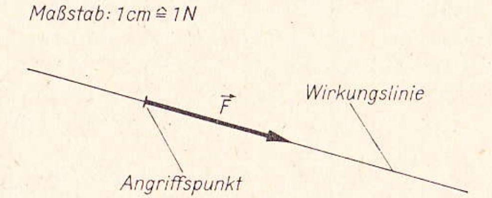


Abb. 22.2. Darstellung der Kraft $\vec{F}$ durch einen Kraftpfeil

22.2. Addition und Zerlegung von Kräften

Wenn mehrere Kräfte auf einen Körper wirken, so addieren sie sich im allgemeinen zu einer Gesamtkraft, die man als Resultante bezeichnet. Da die Kräfte vektorielle Größen sind, erfolgt ihre Addition ebenfalls vektoriell. Wenn zwei Kräfte als Kraftpfeile dargestellt sind, kann ihre Resultante im allgemeinen mit Hilfe eines Vektorparallelogramms konstruiert werden (vgl. Abb. 22.3.). Dabei bilden die

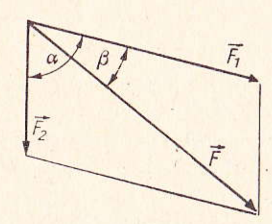


Abb. 22.3. Addition von Kräften mit Hilfe des Kräfteparallelogramms

gegebenen Kräfte die Seiten des Parallelogramms und die Resultante ergibt sich als Diagonale. Der Betrag der Resultante F ist durch den Kosinussatz bestimmt:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}\,.$$

In dieser Gleichung sind F_1 und F_2 die Beträge der gegebenen Kräfte, und α ist der Winkel zwischen ihnen. Die Richtung der Resultante läßt sich mit Hilfe des Sinussatzes bestimmen:

$$\sin \beta = \frac{F_2}{F} \cdot \sin \alpha$$

Die Resultante liegt also zwischen $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ und bildet mit $\vec{F}_1$ den Winkel β (vgl. Abb. 22.3.). Dabei muß aus den beiden möglichen Lösungen für β die für das Problem zutreffende ausgewählt werden.
Wenn mehr als zwei Kräfte gegeben sind, so wendet man die beschriebene Methode zunächst auf zwei Kräfte an und wiederholt sie dann. Man kann auch die gegebenen Kräfte durch Parallelverschiebung zu einem Polygonzug zusammensetzen, wobei man die Resultante als Kraftpfeil vom Angriffspunkt der ersten Kraft bis zum Endpunkt der letzten Kraft erhält (vgl. Abb. 22.4.).

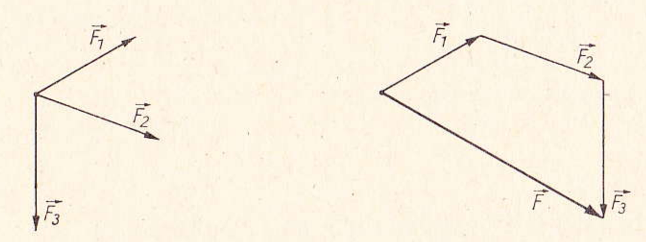


Abb. 22.4. Addition von Kräften mit Hilfe eines Polygonzuges

Falls $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ nicht mit gemeinsamem Angriffspunkt gegeben sind, so müssen sie für die Konstruktion der Resultanten auf den Wirkungslinien bis zu deren Schnittpunkt verschoben werden. Dieser Schnittpunkt bildet den gemeinsamen Angriffspunkt. Auch hier wird die Methode bei mehr als zwei Kräften wiederholt (vgl. Abb. 22.5.).

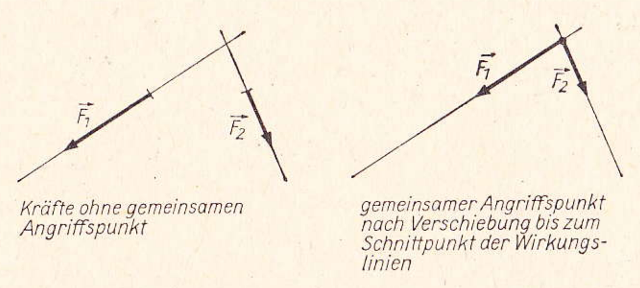


Abb. 22.5. Addition von Kräften ohne gemeinsamen Angriffspunkt

Für parallele Kräfte gibt es keinen Schnittpunkt der Wirkungslinien. In diesem Falle sind besondere Hilfskonstruktionen notwendig, um die Resultante zu erhalten.

Durch Umkehrung der beschriebenen Methode ist die Zerlegung einer gegebenen Kraft in Teilkräfte möglich, die man als Komponenten bezeichnet. Die gegebene Kraft kann dabei wieder als Diagonale in einem Parallelogramm aufgefaßt werden. Da es zu einer Diagonale unendlich viele Parallelogramme gibt, ist die Konstruktion nicht eindeutig. Also muß außer der zu zerlegenden Kraft noch die Richtung oder der Betrag der Komponenten gegeben sein (vgl. Abb. 22.6.). Bei praktischen Problemen lautet die Aufgabe oft, eine Kraft in zwei Komponenten zu zerlegen, deren Richtungen gegeben sind. Dieses Problem ist stets eindeutig lösbar.

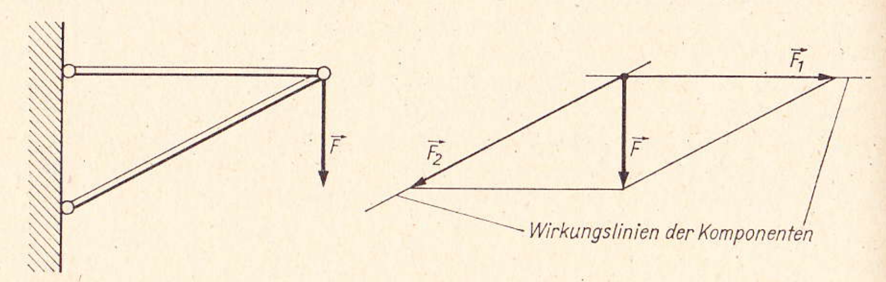


Abb. 22.6. Zerlegung einer Kraft $\vec{F}$ in zwei Komponenten

22.3. Das statische Gleichgewicht einer Punktmasse

Wenn sich eine Punktmasse im Zustand der Ruhe befindet, obwohl mehrere Kräfte auf sie wirken, so stehen diese Kräfte im statischen Gleichgewicht. Das bedeutet, daß die Resultante dieser Kräfte gleich null ist. Sie haben deshalb keine Wirkung

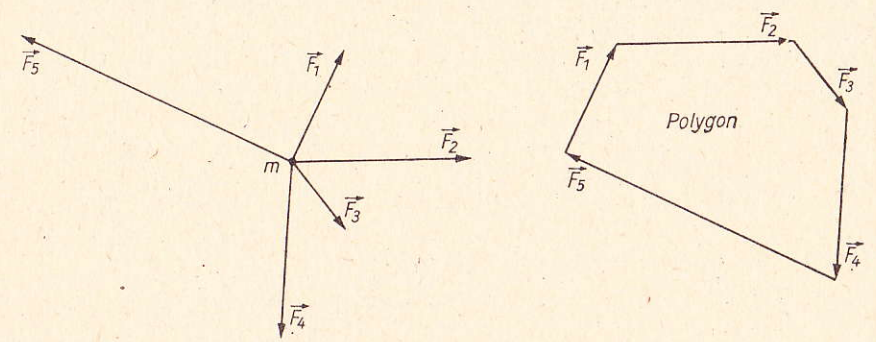


Abb. 22.7. Punktmasse im statischen Gleichgewicht

auf die Punktmasse. Aus diesem Grunde sagt man, daß auch die Punktmasse im statischen Gleichgewicht ist:

► Eine Punktmasse befindet sich genau dann im statischen Gleichgewicht, wenn die Resultante der auf sie wirkenden Kräfte gleich null ist:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \vec{0}$$

Wenn man in diesem Fall die Kräfte durch Parallelverschiebung zusammensetzt, bilden die Kraftpfeile einen geschlossenen Polygonzug. Dabei ist der Endpunkt einer Kraft der Angriffspunkt der nächsten Kraft.

22.4. Das Drehmoment und das statische Gleichgewicht eines starren Körpers

An einem starren Körper kann eine Kraft eine beschleunigte Drehbewegung erzeugen, wenn der Körper drehbar ist und die Wirkungslinie der Kraft nicht durch den Drehpunkt geht. In diesem Falle sagt man, daß die Kraft ein Drehmoment hervorruft. Es kann linksdrehend oder rechtsdrehend sein.
Sein Betrag ist

$$M = r F \cdot \sin \alpha$$

r ist der Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt bzw. von der Drehachse. Das Drehmoment kann als vektorielle Größe dargestellt werden. Seine Richtung ist die Richtung der Drehachse, die in Abb. 22.8. in die Zeichenebene

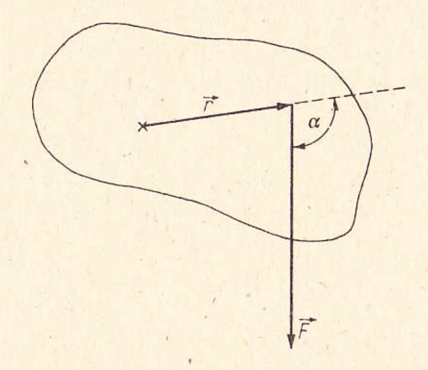


Abb. 22.8. Rechtsdrehendes Drehmoment

hineingeht. Falls mehrere Drehmomente auf einen starren Körper wirken, so kann man sie im allgemeinen zu einem Gesamtdrehmoment zusammenfassen. Dabei werden die Beträge der linksdrehenden Momente mit positivem und die Beträge der rechtsdrehenden Momente mit negativem Vorzeichen genommen, wenn die zugehörigen Kräfte in einer Ebene liegen.
Mit diesen Kenntnissen läßt sich die Gleichgewichtsbedingung für einen starren Körper formulieren. Sie lautet:

▶ Wenn ein starrer Körper im statischen Gleichgewicht ist, so ist die Summe aller auf ihn wirkenden Kräfte und die Summe aller auf ihn wirkenden Drehmomente gleich null:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad \text{und} \quad \sum_i \vec{M}_i = \vec{0}$$

Falls in einem speziellen Problem für die Berechnung der Drehmomente kein Drehpunkt gegeben ist, so muß dieser Satz für jeden beliebigen Punkt des starren Körpers erfüllt sein.

22.5. Anwendung der Sätze über das statische Gleichgewicht auf einige einfache Maschinen

22.5.1. Die feste Rolle

Über die Rolle ist ein Seil gelegt (vgl. Abb. 22.9.). An den Enden des Seiles wirken die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$. Das Gewicht von Rolle, Lagerung und Seil ist $\vec{F}_3$. Für das statische Gleichgewicht dieses Systems erhält man folgende Bedingungen:
Im Aufhängepunkt muß eine Gegenkraft $\vec{F} = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3)$ wirken, damit die Summe aller Kräfte gleich null ist. $\vec{F}_1$ muß gleich $\vec{F}_2$ sein, damit die Summe aller Drehmomente gleich null ist. Dabei erzeugt $\vec{F}_1$ ein linksdrehendes und $\vec{F}_2$ ein rechtsdrehendes Moment bei gleichem Abstand r ihrer Wirkungslinien vom Drehpunkt der Rolle. $\vec{F}$ und $\vec{F}_3$ erzeugen keine Drehmomente.

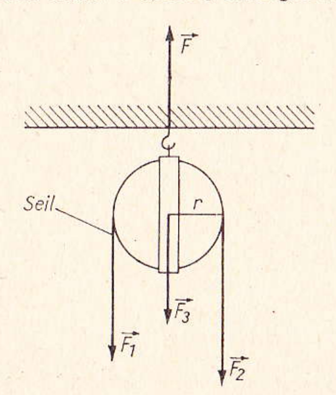


Abb. 22.9. Feste Rolle

Bei der praktischen Verwendung der festen Rolle ist nicht ihr statisches Gleichgewicht von Bedeutung, sondern die Kraft F_2 muß einen Körper vom Gewicht F_1 heben. Dabei ist auch die Reibung zu berücksichtigen. F_2 muß deshalb größer als F_1 sein.

22.5.2. Die lose Rolle

Die Anordnung ist in Abb. 22.10. dargestellt. Aus den Gleichgewichtssätzen folgt

$$\vec{F}_1 = -(\vec{F}_2 + \vec{F}_3) \quad \text{und} \quad \vec{F}_2 = \vec{F}_3 .$$

Daraus ergibt sich für die Beträge

$$F_2 = \tfrac{1}{2} F_1 .$$

Auch hier muß für die praktische Verwendung F_2 größer als $\frac{1}{2} F_1$ sein

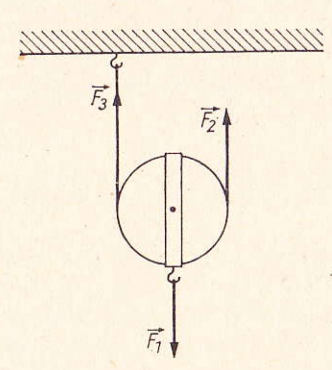


Abb. 22.10. Lose Rolle

Mehrere lose und feste Rollen können zu einem Flaschenzug zusammengesetzt werden.

22.5.3. Der Hebel

Die Abb. 22.11. zeigt einen zweiseitigen, ungleicharmigen Hebel. Das bedeutet, daß die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ auf verschiedenen Seiten vom Drehpunkt wirken und daß die Strecken a und b ungleich sind.

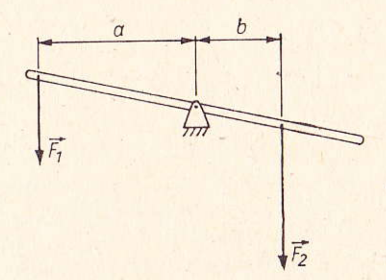


Abb. 22.11. Hebel

Da im statischen Gleichgewicht die Summe aller Drehmomente gleich null sein muß, erhält man als Gleichgewichtsbedingung

$$a \cdot F_1 = b \cdot F_2 .$$

Die Gleichgewichtsbedingung gilt auch für den einseitigen Hebel, wobei man beachten muß, daß bei diesem Hebel die Kräfte nur auf einer Seite vom Drehpunkt wirken. Der Hebel begegnet uns in der Praxis in vielen Maschinen und Geräten.

22.6. Der Massenmittelpunkt

Es wurde bereits früher erklärt, daß man in vielen Fällen einen gegebenen realen Körper als Punktmasse betrachten darf. Dabei denkt man sich die Masse des Körpers in einem Punkt konzentriert. Man hat dann die Aufgabe, die Lage dieses Punktes zu bestimmen. Dazu betrachtet man als einfachstes Beispiel ein System, das aus zwei punktförmigen Massen m_1 und m_2 besteht, die durch einen masselosen Stab verbunden sind. Das System ist im Punkt S unterstützt (vgl. Abb. 22.12.).

m_2 S m_1

Abb. 22.12. Zum Massenmittelpunkt

Dieser Punkt wird so gewählt, daß die Drehmomente entgegengesetzt gleich sind, die von den Gewichten der Massen m_1 und m_2 erzeugt werden. Das System befindet sich dann im statischen Gleichgewicht. Deshalb kann man sich denken, daß die Massen m_1 und m_2 durch eine Masse $m = m_1 + m_2$ ersetzt werden, die sich in S befindet. S ist der Massenmittelpunkt des Systems.
Ein realer Körper kann in Masseneleme̱nte zerlegt werden. Er ist ein System, das nicht aus zwei, sondern aus sehr vielen punktförmigen Massen besteht. Jede dieser Punktmassen hat ein Gewicht, das ein Drehmoment erzeugt, wenn der Körper in einem Punkt gelagert wird. Wie im Beispiel kann man genau einen Punkt so angeben, daß in bezug auf ihn die Summe der Drehmomente aller Massenelemente unabhängig von der Lage des Körpers gleich null ist. Dieser Punkt ist der Massenmittelpunkt des Körpers, in dem man sich die Gesamtmasse des Körpers vereinigt denken kann. Er wird auch als Schwerpunkt bezeichnet, da man zu seiner Erklärung die Gewichte der Massenelemente betrachtet.

Wortliste zum Text

der Angriffspunkt, –e
die Anordnung, –en
auf/fassen A als A
der Aufhängepunkt, –e
aus/wählen A
begegnen, (sich) D (sein)
bilden A
ein Kräftepaar bilden
die Diagonale, –n
das Drehmoment, –e

das Drehspulmeßwerk, –e
die Ebene, –n
in einer Ebene liegen
einfache Maschinen
einseitig
der Endpunkt, –e
entgegengesetzt
entlang G
erfassen A
ergeben sich als N
ersetzen A (durch A)
der Federkraftmesser, –
der Flaschenzug, ⸚e
die Formänderung, –en
gleicharmig
ungleicharmig
das Gleichgewicht
die Gleichgewichtsbedingung, –en
der Hebel, –
hervor/heben A
hob hervor, hervorgehoben
die Hilfskonstruktion, –en
die Komponente, –n
der Kosinussatz, o.
die Kraftmessung, –en
der Kraftpfeil, –e
die Lagerung, –en
lauten
liniengebunden
linksdrehend
masselos
das Massenelement, –e
der Massenmittelpunkt, –e
der Motorläufer
das Newton, – (Einheit)
obwohl
die Parallelverschiebung, –en
der Pfeil, –e
das Polygon, –e
der Polygonzug, ⸚e
rechtsdrehend
die Resultante, –n
feste Rolle
lose Rolle
der Schnittpunkt, –e
die Schraubenfeder, –n
der Schwerpunkt, –e
das Seil, –e
sinnvoll
der Sinussatz, o.
der Stab, ⸚e
statisch
die Teilkraft, ⸚e
die Umkehrung, –en
unendlich viele
unterstützen A
das Vektorparallelogramm, –e
in einer Weise
weitere
die Wirkung, –en
die Wirkungslinie, –n
die Zerlegung, –en
zugehörig
zu/treffen
traf zu, zugetroffen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche beiden Wirkungen kann eine Kraft haben?
2) Womit können Kräfte gemessen werden?
3) Was für eine Größe ist die Kraft?
4) Welche Einheit hat die Kraft?
5) Wie kann man eine Kraft graphisch darstellen?

6) Wie kann man zwei Kräfte, die an einem Punkt angreifen, im allgemeinen addieren?
7) Wie kann man mehrere Kräfte, die an einem Punkt angreifen, addieren?
8) Unter welcher Bedingung ist eine Punktmasse im Gleichgewicht?
9) Unter welcher Bedingung können Kräfte, die an einer Punktmasse angreifen, zu einem Polygon zusammengesetzt werden?
10) Wie ist der Betrag eines Drehmoments definiert?
11) Unter welcher Bedingung ist ein starrer Körper im Gleichgewicht?
12) Wie lautet die Gleichgewichtsbedingung für eine feste und eine lose Rolle?
13) Wodurch unterscheidet sich ein zweiseitiger Hebel von einem einseitigen?
14) Unter welcher Bedingung ist ein Punkt S eines starren Körpers Massenmittelpunkt dieses Körpers?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Kraft als physikalische Größe

Ergänzen Sie den Text!

.... können zwei Arten von Wirkungen haben. Sie können die .... oder die .... eines Körpers verändern. Weil die .... einer Schraubenfeder der Größe der wirkenden Kraft direkt proportional ist, kann man die Kraft mit einem .... messen. Zwei Kräfte sind gleich, wenn sie die gleichen .... haben. Die .... Größe Kraft kann man durch einen Pfeil darstellen. An dieser graphischen Darstellung erkennt man den ...., den .... und die Richtung der Kraft.

Form
Federkraftmesser
Betrag
Verlängerung
Kraft
Richtung
vektoriell
Wirkung
Angriffspunkt
Geschwindigkeit

2.2. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften

2.2.1. *Beantworten Sie folgende Fragen!*

(1) Was versteht man unter der Resultante aus n Teilkräften (Komponenten)?
(2) Wie kann man graphisch die Resultante aus zwei Kräften mit gemeinsamem Angriffspunkt bestimmen?
(3) Welches Ziel hat die Zerlegung von Kräften?

(4) Warum gibt es unendlich viele Möglichkeiten der Zerlegung einer Kraft?
(5) Wodurch kann man eine eindeutige Zerlegung einer Kraft erreichen?

2.2.2. *Interpretieren Sie die Gleichungen!* (Vgl. S. 29)

(1) $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}$ (2) $\sin \beta = \frac{F_2}{F} \sin \alpha$

2.3. Begriffe der Statik

Attributsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe!
Wählen Sie zusammengehörige Wortgruppen aus!

Kraft	Punkt	Drehung nach links bewirken
Angriffspunkt	Moment	Punktmasse, in Ruhe bleiben
Gleichgewicht	Größe	Achse, im Raum festbleiben
linksdrehendes Moment	Rolle	mit einem Federkraftmesser meßbar
feste Rolle	Zustand	Kraft, angreifen

2.4. Das Drehmoment

erweitertes Attribut

2.4.1. *Markieren Sie die erweiterten Attribute des Textes!*

Ein um eine Achse drehbarer starrer Körper kann durch eine Kraft $\vec{F}$ gedreht werden. Die Wirkungslinie der das Drehmoment erzeugenden Kraft darf nicht durch die Achse gehen. Die durch eine Kraft $\vec{F}$ hervorgerufene Drehwirkung ist um so größer, je größer der Abstand der Wirkungslinie der Kraft von der Drehachse ist. Man unterscheidet linksdrehende und rechtsdrehende Momente. Wenn sich die auf einen drehbaren Körper wirkenden Drehmomente gegenseitig aufheben, gibt es keine Drehwirkung. In der Praxis hat die Berechnung der bei einer Maschine auftretenden Drehmomente eine große Bedeutung.

2.4.2. *Bilden Sie zu den Sätzen des Textes Fragen, und bitten Sie einen Freund, diese Fragen zu beantworten!*

► Was kann durch eine Kraft $\vec{F}$ gedreht werden?
Ein starrer Körper, der um eine Achse drehbar ist, kann durch eine Kraft $\vec{F}$ gedreht werden.

2.5. Feste und lose Rolle

2.5.1. *Beantworten Sie folgende Fragen!*

(1) Wie lautet die Gleichgewichtsbedingung für starre Körper?

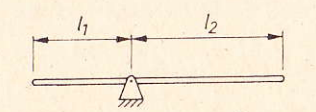
(2) Warum kann man diese Gleichgewichtsbedingung auf die feste und die lose Rolle anwenden?
(3) Wie heißen die mathematischen Darstellungen der Gleichgewichtsbedingungen für die feste und die lose Rolle?
(4) Was folgt aus diesen Gleichgewichtsbedingungen für die Beträge der an der festen und an der losen Rolle wirkenden Kräfte?
(5) Welche Vorteile bietet die Anwendung einer festen und einer losen Rolle?

2.5.2. *Sprechen Sie über die feste und lose Rolle!*

Beachten Sie die Übung 2.5.1.!

2.6. Hebel

2.6.1. *Vergleichen Sie* die beiden Hebel der Abb. 22.13. in bezug auf die Hebelarme und die Beträge der Kräfte, die die Hebel im Gleichgewicht halten!



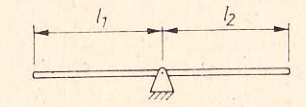
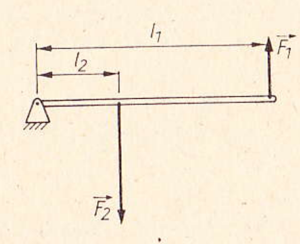


Abb. 22.13.

2.6.2. *Sprechen Sie über beide Hebel* in Abb. 22.14., indem Sie folgende Fragen beantworten!

(1) Wodurch unterscheiden sich die Hebel?
(2) Welche Drehmomente bewirken die einzelnen Kräfte?
(3) Unter welcher Bedingung sind die Hebel im Gleichgewicht?
(4) Welche Aussagen kann man über die Beträge der Kräfte machen?



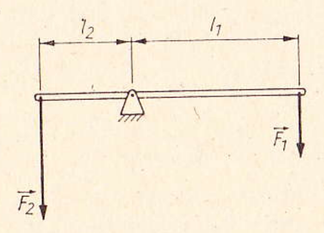


Abb. 22.14.

2.7. Punktmasse und starrer Körper

Vergleichen Sie die Gleichgewichtsbedingungen bei einer Punktmasse und bei einem starren Körper!

2.8. Begriffe der Statik

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach Vorgängen, Zuständen und physikalischen Größen!

Kraft, Drehung, Gewicht, Gleichgewicht, Dehnung, Drehmoment, Bewegungszustand, Verformung, Ruhe

3. Übungen zum Thema

3.1. Kraftzerlegung

Informieren Sie sich in einem Physiklehrbuch, und *sprechen Sie* über folgende Themen!

(1) Die Kraftzerlegung an der geneigten Ebene
(2) Die Kraftzerlegung an einem Kran

3.2. Einfache Maschinen

Erläutern Sie die Funktion und die Gleichgewichtsbedingungen der folgenden einfachen Maschinen, über die Sie sich in einem Physiklehrbuch informieren!

(1) Der Flaschenzug mit n losen Rollen
(2) Das Wellrad
(3) Der Differentialflaschenzug

3.3. Die Zusammensetzung von Kräften

3.3.1. *Erläutern Sie*, wie man in den folgenden Fällen die Resultante der auf einen starren Körper wirkenden Kräfte erhält! Die Kräfte liegen in einer Ebene.

(1) n Kräfte mit gemeinsamem Angriffspunkt ($n > 2$)
(2) 2 nichtparallele Kräfte ohne gemeinsamen Angriffspunkt
(3) 2 parallele Kräfte ohne gemeinsamen Angriffspunkt

Informieren Sie sich in einem Physiklehrbuch!

3.3.2. Für den Betrag F der Resultante aus zwei Kräften gilt die Gleichung $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}$. *Wenden Sie* die Gleichung auf die folgenden Spezialfälle *an*!

(1) $\alpha = 0°$ (3) $\alpha = 180°$
(2) $\alpha = 90°$

Vergleichen Sie die drei Ergebnisse miteinander!

4. Textaufgaben

129. Die Abb. 22.15. zeigt eine Welle, die in den Punkten A und B gelagert ist. Die Masse der Welle beträgt 8 kg. Auf der Welle sind drei Räder befestigt. In welchem Abstand x vom rechten Lager muß das rechte Rad angebracht sein, damit die Auflagerkräfte bei A und B gleich groß werden, und wie groß sind diese dann?

130. Mit welcher Kraft F wird das Seil gespannt, wenn das Gewicht des Körpers 5886 N beträgt? (Vgl. Abb. 22.16.)

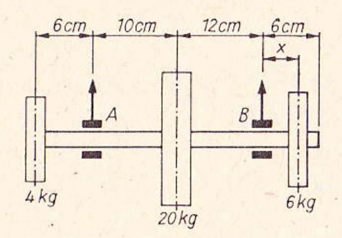


Abb. 22.15.

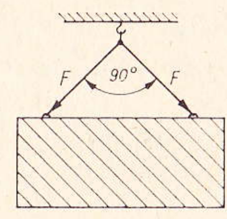


Abb. 22.16.

131. Wie groß ist die Kraft G, wenn a) das Seil a mit der Kraft 1 177 N, b) das Seil b mit der Kraft 834 N gespannt ist? (Vgl. Abb. 22.17.)

132. Die Abb. 22.18. zeigt die Befestigung der Oberleitungen für eine Straßenbahn. Berechnen Sie die Kräfte F_1, F_2 und F_3 in den Spannseilen!

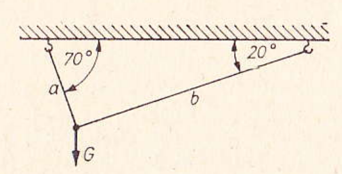


Abb. 22.17.

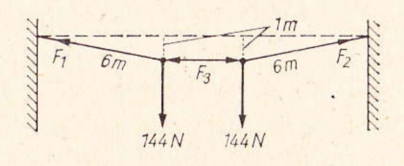


Abb. 22.18.

133. Welche Zugkraft braucht ein Eisenbahnzug von 7848000 N Gewicht auf einer Steigung von 1 : 120? (ohne Berücksichtigung der Reibung)

134. Wieviel wiegt der Körper AB, wenn durch die Kraft F = 736 N Gleichgewicht erreicht wird? (Vgl. Abb. 22.19.)

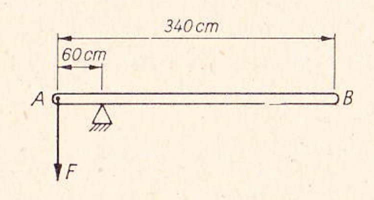


Abb. 22.19.

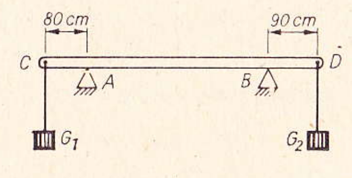


Abb. 22.20.

135. Der Körper CD in Abb. 22.20. ist im Gleichgewicht, wenn er
a) bei A unterstützt wird und G_1 = 490,5 N beträgt.
b) bei B unterstützt wird und G_2 = 392,4 N beträgt.
Berechnen Sie die Länge l und das Gewicht G des Körpers!

136. Welches maximale Drehmoment kann von einer Kraft von 14,7 N erreicht werden, die im Punkt A angreift? (Vgl. Abb. 22.21.)

137. Wie groß sind die Kräfte F_1 und F_2? (Vgl. Abb. 22.22.)

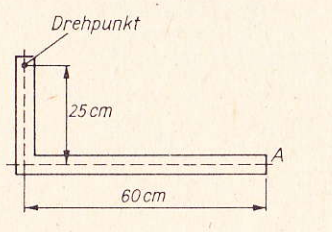


Abb. 22.21.

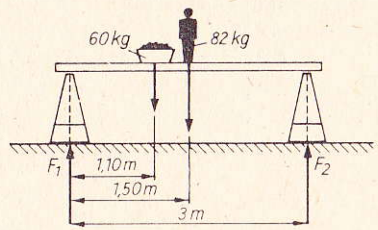


Abb. 22.22.

138. Welche Kraft wirkt bei A (vgl. Abb. 22.23.)?

G_1 = 490,5 N

Gewicht der Rolle G_2 = 98,1 N

139. Welche Kraft F muß am freien Ende des einfachen Flaschenzuges wirken (vgl. Abb. 22.24.), damit Gleichgewicht herrscht? Welche Kräfte wirken in A und B?

G_1 = 1766 N; G_2 = 39,2 N; G_3 = 58,8 N

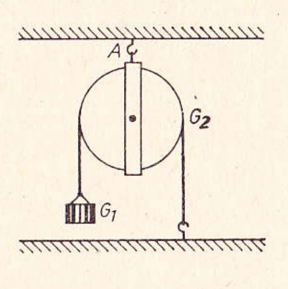


Abb. 22.23.

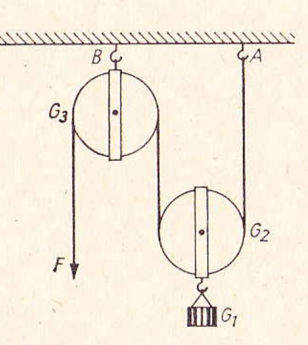


Abb. 22.24.

140. Auf einen Brückenpfeiler wirken die Kräfte S_1 und S_2 (vgl. Abb. 22.25.). Berechnen Sie:
die senkrechte Druckkraft R_v und
die waagerechte Schubkraft R_h!

141. Welche Kräfte wirken auf die Lager A und B einer Brücke durch das Gewicht eines Lastkraftwagens?

$F_1 = 9712$ N, $F_2 = 10890$ N (Vgl. Abb. 22.26.)

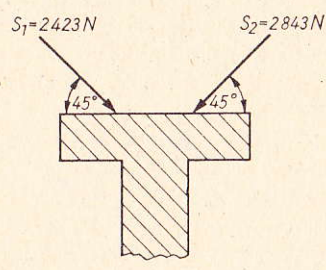


Abb. 22.25.

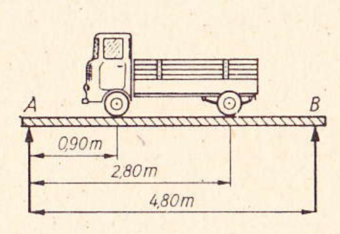


Abb. 22.26.

142. Wie groß muß die Kraft F sein, damit dem Gewicht $G = 785$ N das Gleichgewicht gehalten wird?
Welchen Einfluß hat das Gewicht der Rollen auf F? (Vgl. Abb. 22.27.)

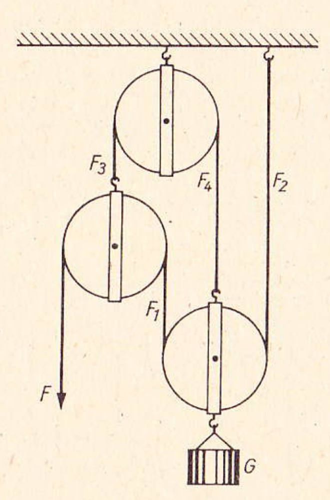


Abb. 22.27.

23. Das Grundgesetz der Dynamik

23.1. Zur dynamischen Betrachtung der Bewegung

In den Texten 20. und 21. wurde die Bewegung von Körpern mit Hilfe der Begriffe Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Zeit beschrieben. Die Ursache der Bewegung wurde nicht berücksichtigt. Diese Art der Betrachtung der Bewegung wurde kinematische Betrachtung der Bewegung genannt. Bei der dynamischen Betrachtung der Bewegung geht man davon aus, daß die Ursache der Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers eine auf den Körper wirkende Kraft ist. Man beschreibt den Bewegungszustand bzw. seine Änderung bei der dynamischen Betrachtung mit Hilfe der wirkenden Kräfte und der Begriffe der Kinematik.

23.2. Grundgesetz der Dynamik

Das Grundgesetz der Dynamik beschreibt den Zusammenhang zwischen der Kraft $\vec{F}$, die auf einen Körper wirkt, und der durch diese Kraft bewirkten Beschleunigung $\vec{a}$. Man findet dieses Gesetz, indem man den Zusammenhang zwischen F und a mit Hilfe eines geeigneten Experiments untersucht, z. B. eines Wagens mit einem Körper, der auf einer Ebene beschleunigt wird. Für einen bestimmten Körper müssen einige Paare von Meßwerten der wirkenden Kraft F und der Beschleunigung a bestimmt werden. Berechnet man den Quotienten F/a, so erhält man einen annähernd konstanten Wert. Das bedeutet, daß für diesen Körper $F \sim a$ ist (vgl. Abb. 23.1.).

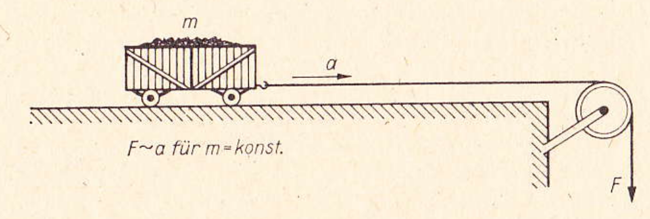


Abb. 23.1. Zum Grundgesetz der Dynamik

Führt man das Experiment mit anderen Körpern aus, so ergeben sich i. a. andere Werte für den Quotienten F/a. Für einen bestimmten Körper ist der Wert des Quotienten aber immer eine Konstante.
Den Quotienten F/a nennt man die Masse m des Körpers. Die Masse ist eine Grundgröße des SI und wird in der Einheit 1 Kilogramm gemessen (vgl. S. 435).

$$[m] = 1 \text{ kg}$$

Den Zusammenhang zwischen $\vec{F}$, $\vec{a}$ und m können wir als Gleichung schreiben.

Wir erhalten das Grundgesetz der Dynamik:

Grundgesetz der Dynamik	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ bzw. $F = m \cdot a$

▶ Die beschleunigende Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.

Diese Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen einer Kraft, einer Masse und der bewirkten Beschleunigung dar.
Setzt man für die Masse die bereits bekannte Einheit 1 kg und für die Beschleunigung die Einheit $1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ein, so ergibt sich für die Einheit der Kraft:

$$[F] = [m \cdot a] = 1\ \text{kg} \cdot \text{m}\,\text{s}^{-2} = 1\ \text{N} \quad (1\ \text{Newton})$$

23.3. Anwendungen des Grundgesetzes der Dynamik

23.3.1. Das Gewicht

Wendet man das Grundgesetz der Dynamik auf das Gewicht eines Körpers an, so ergibt sich das Gewicht als Produkt aus der Masse und der Fallbeschleunigung:

Gewicht	$\vec{G} = m \cdot \vec{g}$ bzw. $G = mg$

Setzt man in dieser Gleichung die Masse des Körpers $m = 1$ kg und $g = 9{,}81\ \text{m}\,\text{s}^{-2}$, so erhält man für sein Gewicht $G = 9{,}81$ N.

23.3.2. Das Trägheitsgesetz

Eine wichtige Folgerung aus dem Grundgesetz der Dynamik erhält man, wenn die Summe aller angreifenden Kräfte null ist. Aus $F = 0$ folgt $a = 0$, da $m \neq 0$ ist. Das bedeutet, daß ein Körper beim Fehlen einer Kraft nicht beschleunigt wird. Wirkt auf einen Körper keine Kraft ein oder ist die Resultante aller angreifenden Kräfte null, so bleibt der Körper in seinem Bewegungszustand. Diese Gesetzmäßigkeit nennt man das Trägheitsgesetz.

▶ Jeder Körper bleibt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern.

Dieses Gesetz wurde von *I. Newton* (1643–1727) ausgesprochen. Aber schon *G. Galilei* (1564–1642) ist bei seinen Untersuchungen zur Fallbewegung auf diese Gesetzmäßigkeit gestoßen. Er folgerte, daß ein bewegter Körper seine Geschwin-

digkeit in waagerechter Ebene unverändert behalten würde, wenn keine Bewegungshindernisse vorhanden wären.

23.3.3. Die Trägheitskraft

Im Abschnitt 23.2. wurde das Grundgesetz der Dynamik für ruhende Bezugssysteme formuliert. Das gleiche Gesetz erhält man, wenn sich das Bezugssystem in gleichförmiger geradliniger Bewegung befindet. Das ist z. B. der Fall bei einem Eisenbahnwagen, der sich geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.
Anders ist es in einem beschleunigten Bezugssystem, z. B. in einem anfahrenden Eisenbahnwagen. Auf dem Boden des Eisenbahnwagens soll sich eine frei bewegliche Kugel befinden. Ein Beobachter, der sich in dem anfahrenden Eisenbahnwagen befindet, sieht die Kugel beim Anfahren entgegengesetzt zur Fahrtrichtung beschleunigt wegrollen. Der Beobachter schließt deshalb auf eine Kraft in Richtung der beschleunigt bewegten Kugel. Eine solche Kraft muß nach dem Grundgesetz der Dynamik existieren. Verbindet man die Kugel mit einem Federkraftmesser wie in Abb. 23.2., so kann man diese Kraft messen. Sie ist eine Trägheitskraft. Man berechnet sie mit Hilfe des Produktes aus der Masse der Kugel und einer Beschleunigung, die den gleichen Betrag wie die Beschleunigung des anfahrenden Eisenbahnwagens, aber die entgegengesetzte Richtung hat:

Trägheitskraft	$\vec{F}_T = -\vec{F} = -m \cdot \vec{a}$

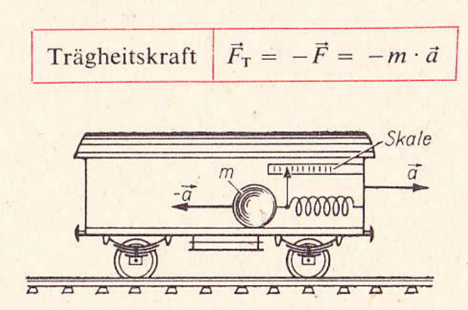


Abb. 23.2. Trägheitskraft einer Kugel (Punktmasse) im beschleunigten Bezugssystem

m ist die Masse der Kugel, a ist der Betrag der Beschleunigung der Kugel in bezug auf den Eisenbahnwagen.
Für den ruhenden Beobachter außerhalb des Eisenbahnwagens existiert diese Trägheitskraft nicht. Für ihn bewegt sich der anfahrende Wagen, und die Kugel bleibt im Zustand der Ruhe. Daraus folgt:

▶ Trägheitskräfte existieren nur für einen Beobachter im beschleunigten Bezugssystem.

■ **Lehrbeispiel:**

In einem Aufzug hängt an einem Federkraftmesser eine Kugel der Masse 10 kg. Welche Kraft in N zeigt der Federkraftmesser an, wenn der Aufzug mit 1 ms^{-2} nach unten beschleunigt wird?

S_1 gegeben:

Masse der Kugel $m = 10$ kg; Beschleunigung $a = 1\ ms^{-1}$

gesucht:

Kraft F_1

S_2 Vom Standpunkt des mitbewegten Beobachters ergibt sich die Abbildung 23.3.

$F_1 = G - F_T$

S_3 $F_1 = m(g - a) = 10\ kg \cdot (9{,}81 - 1)\ ms^{-2}$

$F_1 = 88{,}1\ kg\ ms^{-2} = 88{,}1\ N$

S_4 Infolge der Trägheitskraft ist im nach unten beschleunigten Aufzug das angezeigte Gewicht F_1 kleiner als das wirkliche Gewicht von $G = 98{,}1$ N.

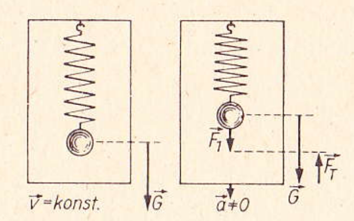


Abb. 23.3. Kräfte, die an der beschleunigt bewegten Kugel angreifen

Wortliste zum Text

die Änderung, -en
der Beobachter, -
das Bewegungshindernis, -se
die Dynamik, o.
das Einheitensystem, -e
der Eisenbahnwagen, -
die Fahrtrichtung, -en
fest/legen A
folgern A
die Folgerung, -en
die Gesetzmäßigkeit, -en
die Grundeinheit, -en
das Hindernis, -se
kräftefrei
der Meßwert, -e
schließen von, aus D (auf A)
schloß, geschlossen
stoßen auf D (sein)
stieß, gestoßen
das Trägheitsgesetz

die Trägheitskraft, ¨-e
waagerecht
weg/rollen (sein)
zulässig
zwingen A
zwang, gezwungen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was ist die Ursache der Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers?
2) Wovon geht man bei der dynamischen Betrachtung der Bewegung aus?
3) Nennen Sie ein Maß für die Trägheit eines Körpers gegenüber der Änderung seines Bewegungszustandes!
4) Formulieren Sie das Grundgesetz der Dynamik in Worten!
5) Formulieren Sie das Trägheitsgesetz!
6) In welchen Bezugssystemen treten Trägheitskräfte auf?
7) Was ist die Ursache von Trägheitskräften?

2. Übungen zum Text

2.1. Das Grundgesetz der Dynamik

Ergänzen Sie den Text!

Bei der .... Betrachtung der Bewegung werden die wirkenden Kräfte nicht beachtet. Bei der .... Betrachtung der Bewegung wird die Änderung des Bewegungszustandes durch das Wirken von .... erklärt. Das Grundgesetz der Dynamik stellt den Zusammenhang zwischen der .... Kraft, der .... des Körpers und der bewirkten Beschleunigung dar.

Masse
kinematisch
wirken
Kraft
dynamisch

2.2. Folgerung aus dem Grundgesetz

erweitertes Attribut

2.2.1. *Markieren Sie die erweiterten Attribute des Textes!*

Die auf einen Körper wirkende Kraft ist die Ursache für die Änderung seines Bewegungszustandes. Die durch die Kraft F bewirkte Beschleuni-

gung hängt von der Masse des Körpers ab. Das durch Experimente bestätigte Grundgesetz der Dynamik stellt diesen für die Beschreibung vieler physikalischer Vorgänge wichtigen Zusammenhang dar. Einige der aus diesem Gesetz folgenden Ergebnisse sollen jetzt genannt werden.
Das auf alle Körper an der Erdoberfläche wirkende Gewicht ist eine spezielle Kraft, die man als Produkt aus Masse und Fallbeschleunigung berechnen kann.
Wenn es keine beschleunigende Kraft gibt, so ändert der Körper seinen Bewegungszustand nicht.
In beschleunigten Bezugssystemen existieren den wirkenden Kräften entgegengerichtete Trägheitskräfte, die es in ruhenden Systemen nicht gibt.

2.2.2. *Beantworten Sie mit Hilfe der Übung 2.2.1. folgende Fragen!* Benutzen Sie, wo es möglich ist, Attributsätze!

(1) Was ist die Ursache für die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers?
(2) Was kann man aus der Masse eines Körpers und der auf ihn wirkenden Kraft berechnen?
(3) Was kann man über den durch das Grundgesetz dargestellten Zusammenhang aussagen?
(4) Welche spezielle Kraft folgt aus dem Grundgesetz?
(5) Unter welcher Bedingung ändert ein Körper seinen Bewegungszustand?
(6) In welchen Systemen gibt es Trägheitskräfte?
(7) Welche Richtung haben Trägheitskräfte?

2.3. Beschreibung physikalischer Zusammenhänge

beschreiben A (mit D)

Beantworten Sie die folgenden Fragen!

(1) Womit beschreibt man bei der kinematischen Betrachtung eine Bewegung?
(2) Womit beschreibt man bei der dynamischen Betrachtung die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers?
(3) Welchen Zusammenhang beschreibt das Grundgesetz der Dynamik?
(4) Womit kann man allgemein physikalische Zusammenhänge beschreiben?

2.4. Begriffe der Dynamik

Attributsatz

Definieren Sie die folgenden Begriffe!

(1) dynamische Betrachtung
(2) Masse
(3) Newton (Einheit)
(4) Gewicht
(5) Trägheitskraft

2.5. Trägheitskraft

2.5.1. *Begründen Sie den Wahrheitswert* folgender Aussagen!

Angabe eines Grundes

(1) Alle Bezugssysteme sind physikalisch äquivalent.
(2) Ein physikalischer Vorgang hängt vom Bezugssystem ab.
(3) Die Beschreibung eines physikalischen Vorgangs hängt vom Bezugssystem ab.
(4) In allen Bezugssystemen wirken Trägheitskräfte.
(5) In beschleunigten Bezugssystemen wirken Trägheitskräfte.
(6) Trägheitskräfte kann man nicht messen.

2.5.2. Ein an einer Schraubenfeder befestigter Körper befindet sich in einem Aufzug. Betrachten Sie die Abbildung 23.4., und *erläutern Sie* die auf den Aufzug wirkenden Kräfte! Unterscheiden Sie dabei die Bewegung des Aufzugs nach oben von der Bewegung des Aufzugs nach unten!

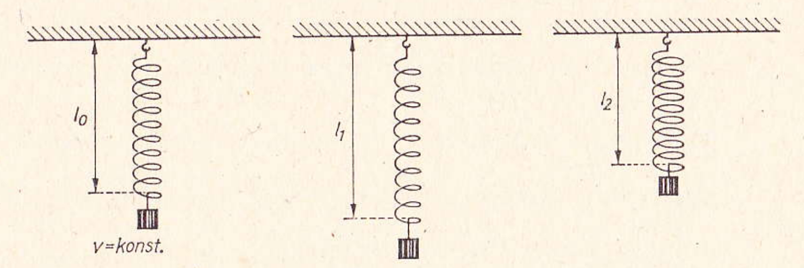


Abb. 23.4.

2.6. Kinematik und Dynamik

Vergleichen Sie die kinematische und die dynamische Betrachtung in bezug auf:

(1) den Gegenstand der Untersuchung,
(2) die zur Untersuchung benutzten physikalischen Größen,
(3) die Ergebnisse der Untersuchung!

3. Übungen zum Thema

3.1. Experimentelle Herleitung des Grundgesetzes der Dynamik

Beschreiben Sie das im Text genannte Experiment zur Herleitung des Grundgesetzes! Wiederholen Sie dazu die experimentelle Methode (vgl. S. 111)! Benutzen Sie die Antworten auf folgende Fragen!

(1) Zwischen welchen Größen soll durch das Experiment ein Zusammenhang gefunden werden?

(2) Was ist über diese Größen schon bekannt?
(3) Welche begründete Hypothese kann man über den Zusammenhang zwischen diesen Größen aufstellen?
(4) Welche Größen müssen im Experiment gemessen werden?
(5) Welche Geräte braucht man zu diesen Messungen?
(6) Welche Versuchsanordnung muß man aufbauen?
(7) Warum führt man das Experiment mehrmals durch?
(8) Welches Ergebnis hat das Experiment?

3.2. Begriffe der Bewegung

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach Vorgängen, Einheiten, Modellen und physikalischen Größen!

Bewegung, Trägheitskraft, Beschleunigung, Kilogramm, Masse, Kreisbewegung, Winkelgeschwindigkeit, Punktmasse, Translation, Meter

3.3. Grundgesetz der Dynamik

Sprechen Sie über die folgenden Themen! Informieren Sie sich zusätzlich in einem Lehrbuch der Physik!

(1) Die Masse als Maß für die Trägheit eines Körpers, ihre Messung und ihre Einheit
(2) Die Anwendung des Grundgesetzes der Dynamik auf die geradlinige Bewegung
(3) Beispiele für das Wirken des Trägheitsgesetzes
(4) Trägheitskräfte in beschleunigten Bezugssystemen am Beispiel der Abb. 23.2.

3.4. Masse und Gewicht

3.4.1. *Unterscheiden Sie* Masse und Gewicht! Untersuchen Sie dazu einen Körper, der sich mit einer Geschwindigkeit, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, von der Erde entfernt!

3.4.2. *Unter welcher Bedingung gelten die folgenden Aussagen?*

Angabe einer Bedingung

(1) Jeder Körper hat ein Gewicht.
(2) Das Gewicht eines Körpers ist konstant.
(3) Die Masse eines Körpers ist konstant.
(4) Durch die Bewegung des Körpers K ändert sich sein Gewicht.
(5) Durch die Bewegung des Körpers K ändert sich sein Gewicht nicht.

4. Textaufgaben

143. Fahrzeuge erreichen in der Zeit t die Geschwindigkeit v. Die Masse der Fahrzeuge mit Fahrer ist m, und F ist die beschleunigende Kraft. Vervollständigen Sie die Tabelle! (Die Reibung wird vernachlässigt.)

Tabelle 23.1.

t/s	v/kmh^{-1}	a/ms^{-2}	m/kg	F/N
2	20		180	
3	40			925
3		5,55		1110
	60		800	1328
12	40		600	
16		0,34		340

144. Ein Auto hat ein Gewicht von 8044 N und wird mit $a = 1{,}7\ \text{ms}^{-2}$ beschleunigt. Welche Kraft ist für diese Beschleunigung notwendig? Welcher Weg wird in den ersten 10 Sekunden zurückgelegt, und welche Geschwindigkeit wird dabei erreicht? (Die Reibung wird vernachlässigt.)

145. Wie lange muß ein Wagen von 12 t Masse beschleunigt werden, damit er bei einer Beschleunigungskraft von 1570 N eine Geschwindigkeit von 2 m/s erreicht? (Die Reibung wird vernachlässigt.)

146. Ein Aufzug fährt mit einer Beschleunigung von 2 ms^{-2} an. Wie groß ist die Kraft, die ein 736 N schwerer Mensch beim Anfahren nach oben bzw. nach unten auf den Boden des Aufzuges ausübt?

24. Anwendungen des Grundgesetzes der Dynamik auf die Kreisbewegung

24.1. Die Radialkraft

In Text 21. wurde die Kreisbewegung eines Körpers kinematisch betrachtet. Danach ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung, weil sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit von Punkt zu Punkt ändert. Es wirkt eine Radialbeschleunigung $\vec{a}_r$ senkrecht zur Bahngeschwindigkeit. Bei der dynamischen Betrachtung der gleichförmigen Kreisbewegung fragt man nach der Ursache dieser Bewegung.
Nach dem Grundgesetz der Dynamik ist die Ursache der Radialbeschleunigung eine Kraft, die zum Zentrum der Kreisbewegung hin gerichtet ist. Man nennt diese Kraft Radialkraft oder Zentripetalkraft $\vec{F}_r$. Für ihren Betrag ergibt sich:

Radialkraft	$F_r = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$

Würde keine Radialkraft wirken, so würde sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung der Bahntangente bewegen. Diese Bewegung wäre die Wirkung der Trägheit.

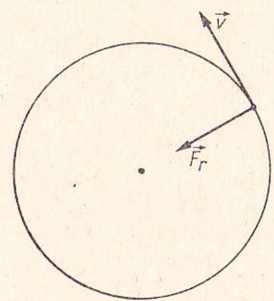


Abb. 24.1. Zur Radialkraft $\vec{F}_r$; $\vec{v}$ zeigt in Richtung der Bahntangente

24.2. Die Zentrifugal- oder Fliehkraft

Bisher haben wir die Kreisbewegung vom Standpunkt des ruhenden Beobachters betrachtet. Man kann sie aber auch vom Standpunkt eines mitbewegten Beobachters beurteilen, der sich also in einem beschleunigten Bezugssystem befindet. Mit einem Federkraftmesser kann der mitbewegte Beobachter eine Kraft messen, die der Radialkraft entgegengerichtet ist (vgl. Abb. 24.2.).

Man nennt diese Kraft Zentrifugalkraft oder Fliehkraft:

Zentrifugalkraft oder Fliehkraft	$F_z = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$ mit $\vec{F}_r = -\vec{F}_z$

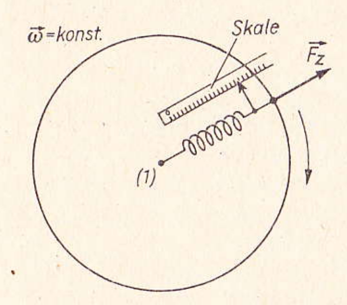


Abb. 24.2. Zur Zentrifugalkraft $\vec{F}_z$;
der mitbewegte Beobachter befindet sich in (1)

Da die Fliehkraft nur für den mitbewegten Beobachter existiert, also nur im beschleunigten Bezugssystem auftritt, ist sie eine Trägheitskraft.

24.3. Die erste kosmische Geschwindigkeit

Wenn man die Bahnen der künstlichen Satelliten und Raumschiffe als Kreisbahnen betrachtet, so kann man mit Hilfe der Radialkraft ihre Bewegung beschreiben und erklären. Die Kreisbahngeschwindigkeit eines Satelliten läßt sich aus der Radialkraft berechnen. Bei der gleichförmigen Kreisbewegung eines Satelliten wirkt sein Gewicht $\vec{G}$ als Radialkraft $\vec{F}_r$. Dann folgt:

$$F_r = G \quad \text{und damit} \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot g.$$

Daraus erhält man als Kreisbahngeschwindigkeit $v = \sqrt{gr}$. Für eine erdnahe kreisförmige Umlaufbahn eines Erdsatelliten erhalten wir:

$$v = \sqrt{9{,}81 \text{ ms}^{-2} \cdot 6{,}37 \cdot 10^6 \text{ m}} = \boxed{7960 \text{ ms}^{-1}.}$$

Diese Geschwindigkeit heißt die erste kosmische Geschwindigkeit. Sie ist die Geschwindigkeit für die gleichförmige Bewegung auf einer erdnahen Kreisbahn. Praktisch ist eine solche Bewegung infolge des Luftwiderstandes nicht möglich. Der Körper muß also zuerst auf eine bestimmte Höhe gebracht werden.

Der erste von Menschen geschaffene Körper, der eine Umlaufbahn um die Erde erreichte, war der sowjetische Sputnik 1. Er wurde am 4. Oktober 1957 gestartet. Mit diesem Start begann ein neuer Abschnitt in der Kosmosforschung. Diese Forschung ist durch die Zusammenarbeit der Sowjetunion mit anderen Ländern auf dem Gebiet der Raumfahrt in eine höhere Entwicklungsphase getreten.

Wortliste zum Text

astronomisch
die Bahntangente, -n
die Entwicklungsphase, -n
erdnah
der Erdsatellit, -en
die Fliehkraft, -̈e
die Forschung, -en
fragen A (nach D)
das Gebiet, -e
gerichtet sein
infolge G
kosmisch
kreisförmig
künstlich
künstlicher Satellit

der Luftwiderstand
die Radialkraft, -̈e
die Raumfahrt
das Raumschiff, -e
der Satellit, -en
schaffen A
schuf, geschaffen
starten A
umkreisen A
die Umlaufbahn, -en
umlaufen A
umlief, umlaufen
die Zentrifugalkraft, -̈e
die Zentripetalkraft, -̈e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung?
2) Durch welche Kraft wird die Radialbeschleunigung hervorgerufen, und wie ist diese Kraft gerichtet?
3) Wie sieht ein ruhender Beobachter die Bewegung eines Körpers nach Verschwinden der Radialkraft?
4) In welchem Bezugssystem existiert bei einer Kreisbewegung eine Zentrifugalkraft, und wie ist sie gerichtet?
5) Welche Beziehungen bestehen zwischen der Radialkraft und der Zentrifugalkraft?
6) Was versteht man unter der ersten kosmischen Geschwindigkeit?

2. Übungen zum Text

2.1. Kräfte bei der Kreisbewegung

Ergänzen Sie den Text!

Die gleichförmige Kreisbewegung ist eine .... Bewegung, weil die .... $a_r = \frac{v^2}{r}$ wirkt. Die Ursache dafür ist eine zum Zentrum gerichtete Kraft, die man .... oder .... nennt. Für einen mitbewegten Beobachter existiert eine nach außen gerichtete Trägheitskraft, die man .... oder .... nennt.

Radialkraft
Zentrifugalkraft
beschleunigen
Fliehkraft
Radialbeschleunigung
Zentripetalkraft

2.2. Beobachtung in verschiedenen Bezugssystemen

Beantworten Sie mit Hilfe der Skizze die folgenden Fragen!

(1) Was unterscheidet die Beobachter in (A) und in (B) voneinander?
(2) Welche Bewegung der Punktmasse m stellt der Beobachter (A) fest?
(3) Was kann er daraus für den Betrag und die Richtung der wirkenden Kraft schließen?
(4) Wie muß der Beobachter (B), der sich mitbewegt, die Bewegung der Punktmasse m beschreiben?
(5) Was kann er daraus für die wirkenden Kräfte schließen, wenn er außerdem beobachtet, daß die Feder gedehnt worden ist?

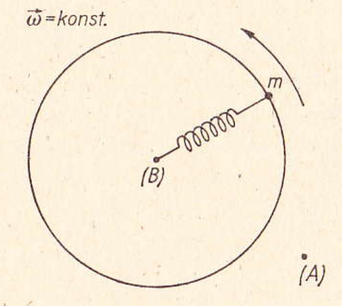


Abb. 24.3.

2.3. Zentripetal- und Zentrifugalkraft

- Angabe eines Grundes

Begründen Sie den Wahrheitswert folgender Aussagen!

(1) Die Ursache jeder Radialbeschleunigung ist eine Zentripetalkraft.
(2) Wenn die Zentripetalkraft nicht mehr wirkt, folgt der Körper der Zentrifugalkraft.
(3) Zentripetal- und Zentrifugalkraft haben die gleichen Beträge.
(4) Wegen der Trägheit bewegt sich der Körper auf der Bahntangente weiter, wenn die Radialkraft nicht mehr wirkt.
(5) In einem ruhenden Bezugssystem kann man die Kreisbewegung nicht mit der Zentrifugalkraft beschreiben.

2.4. Die erste kosmische Geschwindigkeit

2.4.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Wie groß ist die erste kosmische Geschwindigkeit?
(2) Für welche Satellitenbahn benötigt man diese Geschwindigkeit?
(3) Welche Kraft ist die Ursache für diese Satellitenbahn?
(4) Warum spielt bei der Berechnung der ersten kosmischen Geschwindigkeit die Masse des Satelliten keine Rolle?
(5) Warum sind die in der Praxis auftretenden Kreisbahngeschwindigkeiten kleiner als der im Text angegebene Wert?

2.4.2. *Sprechen Sie* über die 1. kosmische Geschwindigkeit! Beachten Sie die Übung 2.4.1.!

3. Übungen zum Thema

3.1. Fliehkraft in der Technik

Halten Sie kurze Vorträge zu folgenden Themen!
Informieren Sie sich in einem Lehrbuch!

(1) Zentrifugen und ihre Anwendung
(2) Der Fliehkraftregler
(3) Die Wirkung von Kurvenüberhöhungen im Straßenbau

3.2. Ergebnisse der Dynamik

erweitertes Attribut

3.2.1. *Markieren Sie die erweiterten Attribute im Text!*

In der Kinematik beachtet man die auf die bewegten Körper wirkenden Kräfte nicht. Die Dynamik ist das Teilgebiet der Physik, in dem der Zusammenhang zwischen der Kraft und der von ihr erzeugten Beschleunigung untersucht wird. Das von *Newton* gefundene Grundgesetz der Dynamik beschreibt diesen Zusammenhang. Das Verhältnis von wirkender Kraft und erzeugter Beschleunigung ist gleich der Masse des von der Kraft beschleunigten Körpers. Das mit einem Experiment zur geradlinigen Bewegung hergeleitete Grundgesetz der Dynamik kann auch auf Kreisbewegungen angewandt werden. Für die Beschleunigung a muß man dabei die für jede Kreisbewegung notwendige Radialbeschleunigung a_r einsetzen. Die dadurch definierte Kraft nennt man die Radialkraft.

3.2.2. *Beantworten Sie folgende Fragen zur Übung 3.2.1.!*
Bilden Sie dazu, wenn es möglich ist, Attributsätze!

(1) Was beachtet man bei der kinematischen Betrachtung nicht?
(2) Was untersucht die Dynamik?
(3) Wie nennt man den Quotienten F/a?
(4) Wie definiert man die Radialkraft?

3.3. Gleichungen der Dynamik

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $F = m \cdot a$;
(2) $G = m \cdot g$;
(3) $F_r = m\frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$;
(4) $F_r = F_z$.

3.4. Die kosmischen Geschwindigkeiten

Informieren Sie sich in einem Lehrbuch über die ersten drei kosmischen Geschwindigkeiten, und *sprechen Sie* über den Betrag und die Bedeutung dieser Geschwindigkeiten!

4. Textaufgaben

147. Stellen Sie die Gleichung für die Radialkraft F_r auf, wenn der Radius r und die Umlaufzeit T gegeben sind!
148. Ein Körper wird an einem Seil, das 1 m lang ist, im Kreis bewegt. Die Masse des Körpers beträgt 100 g. In jeder Sekunde macht der Körper zwei Umdrehungen. Welche Radialkraft ist notwendig?
149. Welche Bahngeschwindigkeit müßte ein Körper haben, wenn er die Erde in der Nähe des Äquators umkreisen soll? (r = 6370 km; Luftwiderstand wird vernachlässigt.)
150. Welche Fliehkraft entsteht, wenn eine Kugel von 2 kg Masse mit einer Drehzahl von 300 min^{-1} an einem 2 m langen Seil im Kreis bewegt wird? Bei welcher Drehzahl reißt das Seil, wenn die Kraft höchstens 8340 N betragen darf?

151. Welchen Winkel bilden die beiden je 30 cm langen Pendel eines Fliehkraftreglers bei $n = 100\ \text{min}^{-1}$ miteinander? (Vgl. Abb. 24.4.)

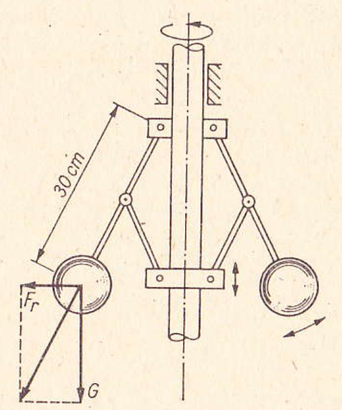


Abb. 24.4.

152. Welchen Durchmesser hat der Rotor einer Ultrazentrifuge, an dessen Umfang bei einer Drehzahl $n = 60000\ \text{min}^{-1}$ die 250000fache Erdbeschleunigung erreicht wird?

25. Die Gravitation

25.1. Das Gravitationsgesetz und seine Entdeckung

Die Geschichte der Entdeckung des Gravitationsgesetzes ist eng mit der Beschreibung der Bewegung der Planeten unseres Sonnensystems verbunden. Bis ins 15. Jahrhundert war man der Auffassung, daß die Erde das Zentrum der Bewegung der Himmelskörper sei. Nach dem von *Ptolemäus* aufgestellten geozentrischen System sollten sich die verschiedenen Himmelskörper auf komplizierten Bahnen um die Erde bewegen. *Nikolaus Kopernikus* (1473–1543), der die Bewegung der Planeten untersuchte, kam zu der Auffassung, daß die Sonne das Zentrum der Bewegung der Planeten ist und die Planeten sich auf verschiedenen Kreisbahnen um die Sonne bewegen. Dieses System nannte er heliozentrisches System. Es war ein großer Fortschritt bei der Beschreibung der Planetenbewegung. Genauere Beobachtungsergebnisse standen aber im Widerspruch zur angenommenen Kreisbahn der Planeten. Dieser Widerspruch führte zur Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung durch *Johannes Kepler* (1571–1630). Er entdeckte, daß sich die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne bewegen. Dabei hängen ihre Umlaufzeit und Bahngeschwindigkeit von der Entfernung von der Sonne ab. *Newton* erkannte die Ursache dieser Bewegung in der Anziehungskraft zwischen Planeten

und Sonne. Er nannte diese Eigenschaft Gravitation oder Massenanziehung. Mit Hilfe der *Keplerschen* Gesetze konnte er das Gravitationsgesetz herleiten:

Gravitationsgesetz	$F = \gamma \dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

γ = Gravitationskonstante

m_1 und m_2 sind zwei Massen, die den Abstand r haben und sich mit der Kraft F anziehen.
Das Gesetz gilt für homogene kugelförmige Massen. Für beliebige Massen gilt es, wenn ihr Durchmesser sehr klein gegenüber ihrem Abstand ist.
Der Wert der Gravitationskonstante konnte durch *Cavendish* (1731–1810) bestimmt werden. Er beträgt nach heutigen Messungen $\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{N m}^2\ \text{kg}^{-2}$

25.2. Anwendungen des Gravitationsgesetzes

Das Gewicht eines Körpers ergibt sich als ein Sonderfall aus dem Gravitationsgesetz. Mit Hilfe des Gravitationsgesetzes kann man auch die Masse eines Himmelskörpers, das Gewicht eines Körpers in beliebigem Abstand von der Erde und die Bahn eines Satelliten berechnen.

■ **Lehrbeispiel:**

Aus der Kraft, mit der ein Körper der Masse $m_1 = 1$ kg an der Erdoberfläche angezogen wird, soll mit Hilfe des Gravitationsgesetzes die Masse m_E der Erde berechnet werden.

S_1 gegeben:

$m_1 = 1$ kg; $r = 6370$ km (Erdradius)

$F = 9{,}81$ N (Gewicht des Körpers mit der Masse 1 kg)

gesucht:

Masse der Erde m_E

S_2 Nach dem Gravitationsgesetz folgt

S_3 $$m_E = \frac{F \cdot r^2}{\gamma \cdot m_1} = \frac{9{,}81\ \text{N} \cdot 6{,}37^2 \cdot 10^{12}\ \text{m}^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2\ \text{kg}^{-2} \cdot 1\ \text{kg}} = 5{,}97 \cdot 10^{24}\ \text{kg}$$

Damit ergibt sich als Masse der Erde $5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg.

25.3. Das Gravitationsfeld

Nach dem Gravitationsgesetz wird von einem Körper der Masse m auf einen anderen Körper eine Kraft ausgeübt. Diese Kraft ist vom Abstand der beiden Körper abhängig. Es existiert also im Raum um den Körper der Masse m ein Kraftfeld (vgl. Abb. 25.1.). Das Kraftfeld kann man durch seine Wirkung auf einen Probe-

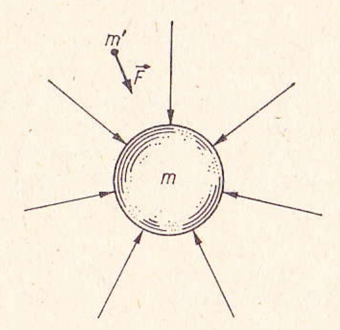


Abb. 25.1. Gravitationsfeld eines kugelförmigen Körpers

körper der Masse m' nachweisen. Der Quotient aus der Kraft F und der Probemasse m' ist für jeden Punkt des Raumes um die Masse m eine charakteristische Feldgröße und heißt Gravitationsfeldstärke $g = F/m'$. Aus dem Gravitationsgesetz folgt dann:

Gravitationsfeldstärke	$g = \frac{\gamma \cdot m}{r^2}$	$[g] = 1\,\mathrm{ms^{-2}}$

Die Gravitationsfeldstärke hat die Einheit einer Beschleunigung. Sie ist die Fallbeschleunigung eines Körpers im Gravitationsfeld eines Himmelskörpers der Masse m im Abstand r.

Wortliste zum Text

die Anziehungskraft, ¨-e
die Auffassung, -en
auf/stellen A
ein System aufstellen
das Beobachtungsergebnis, -se
Cavendish, Henry
die Ellipse, -n
die Entdeckung, -en
die Entfernung, -en
der Fortschritt, -e
geozentrisch
die Gravitation, o.
das Gravitationsfeld, -er
die Gravitationsfeldstärke, -n
das Gravitationsgesetz, o.
die Gravitationskonstante, o.
heliozentrisch
heutig

der Himmelskörper, -
Kepler, Johannes
kompliziert
Kopernikus, Nikolaus
eine Kraft ausüben auf A
die Massenanziehung, o.
der Mond
der Planet, -en
die Planetenbewegung, -en
die Probemasse, -n
Ptolemäus, Claudius
das Sonnensystem
das Werkzeug, -e
im Widerspruch stehen zu D

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wie nennt man die von *Ptolemäus* bzw. von *Kopernikus* aufgestellten Systeme der Himmelskörper?
2) Welcher Unterschied besteht zwischen dem geozentrischen und dem heliozentrischen System?
3) Auf was für Bahnen bewegen sich die Planeten nach *Kepler*?
4) Worin sah *Newton* die Ursache der Planetenbewegung?
5) Wie lautet das Gravitationsgesetz in Worten?
6) Wie kann man das Gravitationsfeld nachweisen, das im Raum um einen Körper der Masse m existiert?
7) Wie ist die Gravitationsfeldstärke eines Gravitationsfeldes definiert?

2. Übungen zum Text

2.1. Vorstellungen von unserem Sonnensystem

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Schon lange beobachten die Menschen die Bewegung der .... Sie versuchten, die .... für diese Bewegung zu finden. Dabei entwickelten sie mehrere .... Das von *Ptolemäus* aufgestellte System heißt ...., weil angenommen wird, daß die Erde das Zentrum unseres Planetensystems sei. Dieses System entsprach nicht der .... Realität. *Kopernikus* fand ein heliozentrisches System, in dem sich die .... auf Kreisen um die .... bewegen. Dieses Modell kommt der Wahrheit nahe.

Ursache
geozentrisch
Himmelskörper
System
Ellipse
Sonne
Planet

Eine noch genauere Beschreibung unseres Sonnensystems fand *Kepler*, der erkannte, daß sich die Planeten nicht auf ...., sondern auf .... um die Sonne bewegen. So erkannten die Menschen die objektive Realität immer besser.

objektiv
Kreis
Realität

2.1.2. *Sprechen Sie* über die Entwicklung von Vorstellungen über unser Sonnensystem!

2.2. Das Gravitationsgesetz

Passiv

2.2.1. *Setzen Sie die Verben so ein, daß die Sätze im Passiv stehen!*

(1) Wir wissen, daß das Gravitationsgesetz von *Newton* .... (finden)
(2) Dieses Gesetz sagt, daß ein Körper von einem anderen Körper .... (anziehen)
(3) Damit war von *Newton* die Ursache der Planetenbewegung .... (entdecken)
(4) Durch diese Entdeckung konnten von *Newton* die *Keplerschen* Gesetze .... (beweisen)
(5) Damit war ein wichtiger Abschnitt der Entwicklung wahrer Erkenntnisse über unser Sonnensystem .... (beenden)

2.2.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

erweitertes Attribut

Verwenden Sie dabei erweiterte Attribute!

(1) Wer fand das Gravitationsgesetz, das auf alle Massen anwendbar ist?
(2) Was ist die Ursache der Kraft, die auf die Planeten wirkt?
(3) Wovon hängt die Gravitationskraft ab, die zwischen zwei Massen m_1 und m_2 wirkt?
(4) Welchen Wert hat die Gravitationskonstante, die universell gültig ist?

2.3. Das Gravitationsfeld

Angabe einer Bedingung

Nennen Sie die Bedingungen, unter denen die folgenden Aussagen gelten!

(1) Jeder Körper hat ein Gewicht.
(2) Körper, die sich in einem Gravitationsfeld befinden, bewegen sich zum Ursprung des Feldes.

(3) Auf Körper gleicher Masse wirkt die gleiche Gravitationskraft.
(4) Auf Körper mit den verschiedenen Massen m_1 und m_2 wirkt die gleiche Gravitationskraft.
(5) Bei der Bewegung eines Körpers im Gravitationsfeld bleibt sein Gewicht konstant.
(6) Die Gravitationsfeldstärke g hat den Wert 9,81 ms^{-2}

2.4. Entwicklung durch Lösung von Widersprüchen

im Widerspruch stehen zu D, einen Widerspruch lösen durch A

Beantworten Sie die Fragen in vollständigen Sätzen!

(1) Wozu stand das geozentrische Weltbild *Ptolemäus'* im Widerspruch?
(2) Wodurch konnte *Kopernikus* diesen Widerspruch lösen?
(3) Wozu stand das heliozentrische System *Kopernikus'* im Widerspruch?
(4) Was war die Ursache für diesen Widerspruch?
(5) Wodurch konnte *Kepler* diesen Widerspruch lösen?

3. Übungen zum Thema

3.1. Physikalische Felder

3.1.1. *Vergleichen Sie* das elektrische Feld, das magnetische Feld und das Gravitationsfeld in bezug auf:

(1) die Quellen der Felder,
(2) die Feldgrößen,
(3) die mathematische Darstellung der wirkenden Kräfte,
(4) die Feldkonstanten,
(5) den Einfluß eines Stoffes im Feld und
(6) das Feldlinienmodell!

3.1.2. *Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!* (Vgl. S. 29)

(1) $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ (3) $G = m \cdot g$

(2) $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ (4) $G = m \frac{\gamma M}{r^2}$

3.1.3. *Vergleichen Sie* die Gleichungen (1) und (2) bzw. (3) und (4) in bezug auf:

(1) den dargestellten Sachverhalt,
(2) die mathematische Struktur und
(3) die physikalischen Größen!

3.2. Die Entdeckungen Kopernikus' und Keplers

Bereiten Sie mit Hilfe eines Lehrbuches kurze Vorträge zu folgenden Themen vor!

(1) Die Bedeutung der Erkenntnisse *Kopernikus'* für die Entwicklung eines wissenschaftlichen Weltbildes
(2) Die drei *Keplerschen* Gesetze und ihre Bedeutung für die Beschreibung unseres Sonnensystems

3.3. Begriffe der Dynamik

Fassen Sie gleichartige Begriffe zusammen, und suchen Sie die Oberbegriffe!

Newton, Feldlinie, Geschwindigkeit, Federkraftmesser, Gleichgewicht, Translation, Wagen, Joule, freier Fall, Radialbeschleunigung, Pendel, Punktmasse, Kraft, Ruhe, starrer Körper, Kreisbewegung, Feldstärke.

4. Textaufgaben

153. Welchen Wert hat die Erdbeschleunigung 900 km über der Erdoberfläche?
154. Die Masse des Mondes ist etwa 81mal kleiner als die der Erde, sein Durchmesser beträgt etwa 0,273 Erddurchmesser. Welches Gewicht hat an seiner Oberfläche die Masse 1 kg?
155. Leiten Sie die Fallbeschleunigung g aus dem Gravitationsgesetz her! Wie ändert sich die Fallbeschleunigung mit zunehmender Höhe?
156. Welche Höhe über der Erdoberfläche müßte ein Sputnik haben, dessen Umlaufzeit auf einer Kreisbahn gleich der Dauer der Erdrotation (23 h 56 min) ist?
157. Wie groß ist die Gravitationsstärke g' an der Oberfläche der Sonne? Die Masse der Sonne beträgt $1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg, und der Durchmesser der Sonne ist 695 300 km.

*158. Ein Körper befindet sich zwischen Erde und Mond. In welcher Entfernung vom Erdmittelpunkt wird er schwerelos? Der Abstand Erdmittelpunkt – Mondmittelpunkt beträgt 384 400 km, und die Mondmasse ist $\frac{1}{81}$ der Erdmasse.

26. Die mechanische Arbeit, die Leistung und der Wirkungsgrad

26.1. Die mechanische Arbeit

Wenn man einen Körper hebt, elastisch verformt oder beschleunigt, so muß man eine mechanische Arbeit verrichten. Dabei wird der Körper mit Hilfe einer Kraft längs des Weges bewegt. Die an dem Körper verrichtete Arbeit wird als mechanische Energie gespeichert.
Für eine geradlinige Verschiebung längs eines Weges s mit der konstanten Kraft F ergibt sich für die mechanische Arbeit W:

(1)	Arbeit bei konst. Kraft	$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos(\vec{F}, \vec{s})$	$[W] = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$

Die mechanische Arbeit ist hierbei das Produkt aus der Kraftkomponente $F \cdot \cos(\vec{F}, \vec{s})$ in Wegrichtung und dem Weg s.

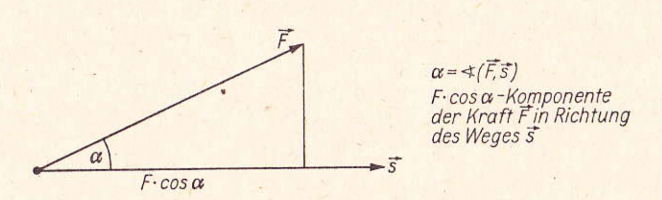


Abb. 26.1. Zur Definition der mechanischen Arbeit

Steht die Kraft senkrecht zur Wegrichtung, so wird wegen $\cos 90° = 0$ keine mechanische Arbeit verrichtet. Fallen die Richtung der Kraft und die Wegrichtung zusammen, so ergibt sich $W = F \cdot s$.
Wird angenommen, daß die Kraft längs eines Weges s nicht konstant sei, so wird die mechanische Arbeit mit Hilfe eines Integrals bestimmt:

(2)	Arbeit bei ortsabhängiger Kraft	$W = \int_{s_0}^{s_1} \vec{F}(s) \cdot d\vec{s} = \int_{s_0}^{s_1} F(s) \cdot \cos(\vec{F}, \vec{s}) \cdot ds$

W ist die längs des Weges von s_0 nach s_1 verrichtete Arbeit. Die Gleichung (2) ist die allgemeine Definition der mechanischen Arbeit, aus der sich Gleichung (1) herleiten läßt.
Man unterscheidet nun verschiedene Arten der mechanischen Arbeit. Hebt man zum Beispiel einen Körper, so muß man Arbeit gegen die Schwerkraft verrichten, d. h., gegen die Kraft, mit der der Körper von der Erde angezogen wird. Diese Arbeit heißt Hubarbeit. Kraft und Weg haben hier die gleiche Richtung. Die Kraft

ist für kleine Wegdifferenzen annähernd konstant und gleich dem Gewicht des Körpers. Nach (1) ergibt sich für einen Körper der Masse m, der um die Höhe h gehoben wird, die Hubarbeit:

Hubarbeit	$W_H = m \cdot g \cdot h$

Dehnt man eine Feder, so muß man Arbeit gegen die Federkraft verrichten. Diese Kraft ist aber nicht konstant, sondern vom Weg abhängig. Für die Dehnungsarbeit einer Feder mit der Federkraft $F(s) = D \cdot s$ und der Federkonstanten D gilt dann nach (2):

Dehnungsarbeit	$W_D = \int_0^s D \cdot s \cdot ds = \frac{D \cdot s^2}{2}$

Die Dehnungsarbeit und die Hubarbeit sind Beispiele von Verschiebungsarbeit. Man kann an einem Körper auch Beschleunigungsarbeit verrichten. Dadurch wird die Geschwindigkeit des Körpers erhöht. Mit $F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$ und (42) erhält man die Beschleunigungsarbeit:

Beschleunigungsarbeit	$W_B = \int_0^v m \cdot v \cdot dv = \frac{m}{2} v^2$

26.2. Die mechanische Leistung

Neben der mechanischen Arbeit verwendet man noch den Begriff der mechani schen Leistung. Sie wird als Quotient aus der verrichteten Arbeit W und der Zeit t definiert:

mechanische Leistung	$P = \frac{W}{t}$	$[P] = 1$ W

Die mechanische Leistung wird in der Einheit Watt (W) gemessen. Setzen wir voraus, daß die in gleichen Zeiten aufgewendete Arbeit W nicht konstant ist, so wird die Leistung mit Hilfe der Differentialrechnung bestimmt:

Momentanleistung	$P = \frac{dW}{dt}$

Die mechanische Leistung ist eine Größe, die angibt, wie schnell eine mechanische Arbeit verrichtet wird.

26.3. Der mechanische Wirkungsgrad

Alle mechanischen Vorgänge, bei denen eine mechanische Arbeit verrichtet wird, sind mit Reibung verbunden. Ein Teil der mechanischen Energie wird bei solchen Vorgängen in Wärme umgewandelt. Dieser Teil der Energie geht für die mechanische Nutzung verloren.
Vergleicht man z. B. für eine energieumwandelnde Maschine die zugeführte Leistung P_{zu} mit der abgegebenen Leistung P_{ab}, so erhält man für den mechanischen Wirkungsgrad:

mechanischer Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$

Der mechanische Wirkungsgrad ist ein Maß für die mechanische Güte einer energieumwandelnden Maschine. Er gibt an, wie groß der Teil der technisch nutzbaren mechanischen Leistung ist. Die abgegebene Leistung wird oft auch als effektive Leistung und die zugeführte Leistung als indizierte Leistung bezeichnet.

■ **Lehrbeispiel:**

Eine kleine Wasserturbine, bei der die Fallhöhe des Wassers 2,5 m und der Wasserzulauf 80 kg/s betragen, hat eine Leistung von 1540 W. Wie groß ist ihr Wirkungsgrad?

S_1 gegeben:
Masse des Wassers m, Fallhöhe des Wassers h,
Fallzeit t, abgegebene Leistung P_{ab}
gesucht:
mechanischer Wirkungsgrad

S_2
S_3
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab} \cdot t}{m \cdot g \cdot h} = \frac{1540 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{80 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}5 \text{ Nm}} = \frac{1540 \text{ W}}{80 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}5 \text{ W}} = 0{,}79$$

Der Wirkungsgrad beträgt 79%.

Wortliste zum Text

auf/wenden A
aus/sagen
die Beschleunigungsarbeit, -en
die Dehnungsarbeit, -en
die Federkraft, ⸚e
die Güte, o.
heben A
hob, gehoben
die Hubarbeit, -en
längs G

die Leistung, –en
effektive Leistung
indizierte Leistung
die Momentanleistung, –en
nutzbar
die Nutzung, o.
die Schwerkraft, ⸚e
die Trägheit überwinden
verloren/gehen (sein)
ging verloren, verlorengegangen
die Verschiebung, –en
die Verschiebungsarbeit, –en
der Vorgang, ⸚e
die Wasserturbine, –n
der Wasserzulauf
die Wegrichtung, –en
zusammen/fallen (mit D) (sein)
fiel zusammen, zusammengefallen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wie ist die Arbeit für eine geradlinige Verschiebung längs eines Weges s definiert, wenn die Kraft konstant ist?
2) Wie wird die mechanische Arbeit berechnet, wenn die Kraft längs des Weges nicht konstant ist?
3) Welche Arten der Verschiebungsarbeit unterscheidet man, und wie berechnet man sie?
4) Unter welcher Bedingung wird an einem Körper Beschleunigungsarbeit verrichtet?
5) In welcher Einheit gibt man die Arbeit an?
6) Definieren Sie die mechanische Leistung, und geben Sie die Einheit für die Leistung an!
7) Was versteht man unter dem mechanischen Wirkungsgrad?

2. Übungen zum Text

2.1. Begriff der mechanischen Arbeit

Angabe einer Bedingung

Beantworten Sie die folgenden Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!

(1) Unter welcher Bedingung wird an einem Körper mechanische Arbeit verrichtet?
(2) Unter welcher Voraussetzung erhöht sich die mechanische Energie eines Systems?
(3) Unter welcher Voraussetzung darf man die mechanische Arbeit mit dem Produkt $F \cdot s \cdot \cos(\vec{F}, \vec{s})$ berechnen?

(4) Unter welcher Bedingung kann man die mechanische Arbeit mit der Gleichung $W = F \cdot s$ berechnen?
(5) Unter welcher Bedingung wird keine mechanische Arbeit verrichtet, obwohl Kraft und Weg ungleich null sind?
(6) Unter welcher Voraussetzung braucht man zur Berechnung der mechanischen Arbeit die Integralrechnung?

2.2. Arten der mechanischen Arbeit

2.2.1. *Definieren Sie!*

(1) Hubarbeit,
(2) Beschleunigungsarbeit,
(3) Dehnungsarbeit

2.2.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen in vollständigen Sätzen!*

eine Arbeit verrichten (an D)

(1) Wie kann man allgemein die mechanische Energie eines Körpers erhöhen?
(2) Wie kann man an einem Körper Hubarbeit verrichten?
(3) Wovon hängt der Betrag der an einem Körper verrichteten Hubarbeit ab?
(4) An welchen Körpern kann man Dehnungsarbeit verrichten?
(5) Wie kann man an einem Körper Beschleunigungsarbeit verrichten?
(6) Unter welcher Bedingung sind die an zwei Körpern gleicher Masse und gleicher Anfangsgeschwindigkeit verrichteten Beschleunigungsarbeiten gleich groß?

2.2.3. *Vergleichen Sie* Hubarbeit und Dehnungsarbeit! Ergänzen Sie dazu die folgende Tabelle!

Tabelle 26.1.

	Hubarbeit	Dehnungsarbeit
Gleichung		
Bedingung für die Gleichung		
W-s-Diagramm		
Beispiel		

2.3. Leistung, Arbeit und Wirkungsgrad

Angabe eines Grundes

Begründen Sie den Wahrheitswert folgender Aussagen!

(1) Wenn die mechanische Arbeit groß ist, ist auch die Leistung groß.
(2) Je größer die Leistung eines Systems ist, desto größer ist die von ihm in der Zeiteinheit verrichtete Arbeit.
(3) Wenn man den mechanischen Wirkungsgrad einer Maschine kennt, kann man die abgegebene Leistung berechnen!
(4) Der mechanische Wirkungsgrad einer Maschine kann theoretisch gleich 1 sein.
(5) Der mechanische Wirkungsgrad ist in der Praxis immer kleiner als 1.

2.4. Arbeit und Wirkungsgrad

Konjunktiv

Bilden Sie nach dem Muster Sätze!

► Die Arbeit ist keine vektorielle Größe, weil sie keine Richtung hat. Wenn die Arbeit eine Richtung hätte, so wäre sie eine vektorielle Größe.

(1) Die mechanische Arbeit ist null, weil die Kraft senkrecht zum Wege wirkt.
(2) Man kann die mechanische Arbeit als Produkt aus Kraft und Weg berechnen, weil die Kraft in Richtung des Weges wirkt.
(3) Zur Berechnung der Hubarbeit braucht man keine Integralrechnung, weil man eine konstante Kraft annimmt.
(4) Die Dehnungsarbeit ist eine Verschiebungsarbeit, weil sich der Bewegungszustand der Feder beim Dehnen nicht verändert.
(5) Der Wirkungsgrad mechanischer Vorgänge ist kleiner als 1, weil dabei Reibung auftritt.

3. Übungen zum Thema

3.1. Gleichungen zu Arbeit und Leistung

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $W = F \cdot s \cdot \cos(\vec{F}, \vec{s})$
(2) $W = G \cdot h$
(3) $W = P \cdot t$
(4) $W = U \cdot I \cdot t$
(5) $P = F \cdot v$

3.2. Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie

Bereits vor 2000 Jahren kannte man die Goldene Regel der Mechanik. Sie lautet:

► Was an Kraft gespart wird, muß an Weg hinzugefügt werden.

3.2.1. *Interpretieren Sie* diese Regel als Erhaltungssatz der mechanischen Energie!

3.2.2. *Erläutern Sie* die Gültigkeit dieser Regel an folgenden einfachen Maschinen:

(1) geneigte Ebene; (2) feste Rolle und (3) lose Rolle!

3.3. Arbeit im Gravitationsfeld

Ein Körper der Masse m_1 befindet sich in dem Gravitationsfeld des Zentralkörpers m_2. Sein Abstand vom Zentralkörper sei gleich r_1. Er wird im Gravitationsfeld so bewegt, daß er am Ende der Bewegung den Abstand r_2 vom Zentralkörper hat.

3.3.1. *Berechnen Sie* die zu dieser Bewegung notwendige Arbeit, wenn $r_2 > r_1$ ist!

3.3.2. *Erläutern Sie* den Spezialfall: $r_1 = r_2$!

4. Textaufgaben

159. Welche Arbeit ist notwendig, um 5000 l Wasser in ein 35 m höher gelegenes Becken zu transportieren?
160. Um eine Schraubenfeder 15 cm zu dehnen, ist eine Arbeit von 0,81 Nm notwendig. Wie groß ist die Kraft F_x am Ende der Dehnung, wenn die Kraft am Anfang 0,98 N beträgt?
161. Welche Beschleunigungsarbeit verrichtet eine Lokomotive, wenn sie einen Zug mit einer Masse von $8 \cdot 10^5$ kg aus der Ruhe auf eine Geschwindigkeit von 20 m/s beschleunigt?
162. Ein Kran hebt einen Körper von 245000 N Gewicht gleichförmig in 11 min 3,2 m hoch. Der Motor hat eine Leistung von 1850 W. Wie groß sind die effektive Leistung und der Wirkungsgrad der Anlage?
163. Ein Aufzug mit einer Masse von 3 t wird gleichmäßig beschleunigt nach oben bewegt. Nach 40 m hat er eine Geschwindigkeit von 12 m/s erreicht. Wie groß muß die Durchschnittsleistung des Motors sein, wenn der Wirkungsgrad der Anlage 0,8 beträgt?

27. Der Energieerhaltungssatz der Mechanik und der Impulserhaltungssatz

27.1. Mechanische Energie und Energieerhaltungssatz

Einen Erhaltungssatz kann man formulieren, wenn eine Größe, die sogenannte Erhaltungsgröße, in einem abgeschlossenen physikalischen System zeitlich konstant bleibt. Ein physikalisches System ist abgeschlossen, wenn in ihm nur innere Vorgänge ablaufen, auf die von außen keine Einwirkungen ausgeübt werden. Für die Energie, die eine Erhaltungsgröße eines abgeschlossenen physikalischen Systems ist, kennen wir bereits den Satz von der Erhaltung der Energie. Als Sonderfall kann man daraus den Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie herleiten.

Dazu müssen wir die Größen potentielle und kinetische Energie einführen. Potentielle Energie entsteht immer dann, wenn an einem Körper Verschiebungsarbeit* verrichtet wird. Die Zunahme an potentieller Energie ist gleich der zugeführten Verschiebungsarbeit. Für die Hubarbeit erhalten wir z. B.:

$\Delta E_{pot} = W_H = mgh;$	$h_0 = 0$

Kinetische Energie entsteht, wenn an einem Körper Beschleunigungsarbeit verrichtet wird. Die Zunahme an kinetischer Energie ist gleich der zugeführten Beschleunigungsarbeit.

Wir erhalten dann:

$\Delta E_{kin} = W_B = \frac{m}{2} v^2;$	$v_0 = 0$

Potentielle und kinetische Energie werden zusammen auch als mechanische Energie bezeichnet.

Wir betrachten für ein bestimmtes mechanisches System die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und umgekehrt. Ein solches mechanisches System ist z. B. ein Körper, der von einer bestimmten Höhe frei fällt. Wird vorausgesetzt, es trete keine Umwandlung von mechanischer in andere Energieformen auf, so ist die Zunahme an kinetischer Energie stets gleich der Abnahme an potentieller Energie.

$$d\,E_{kin} = -d\,E_{pot}$$

* Die Reibungsarbeit wird in diesem Zusammenhang nicht als Verschiebungsarbeit bezeichnet, da mit dem Entstehen der Reibungsarbeit die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie verbunden ist.

Daraus folgt durch Integration der Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie:

Energieerhaltungssatz der Mechanik	$E_{kin} + E_{pot} = \text{konst.}$

► In einem abgeschlossenen System ist die Summe aus kinetischer und potentieller Energie konstant, wenn nur mechanische Vorgänge stattfinden.

Die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und umgekehrt kann an der Bewegung einer Stahlkugel auf einer Glasplatte dargestellt werden. Nimmt man an, daß Stahlkugel und Glasplatte vollkommen elastische Körper seien, so ist in jedem Moment die Summe aus kinetischer und potentieller Energie konstant und gleich der mechanischen Gesamtenergie des Systems.

E_{pot}	E_{kin}	$E_{pot}+E_{kin}$
mgh	0	mgh
mgh_1	$\frac{m}{2}\left(\sqrt{2g(h-h_1)}\right)^2$	mgh
0	$\frac{m}{2}\left(\sqrt{2gh}\right)^2$	mgh

Abb. 27.1. Zum Energieerhaltungssatz

27.2. Impuls und Impulserhaltungssatz

Der Impuls ist eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines Körpers charakterisiert. Unter Impuls verstehen wir das Produkt aus der Masse und der Geschwindigkeit des Körpers:

Impuls	$\vec{I} = m \cdot \vec{v}$	$[I] = 1\ \text{kg m s}^{-1} = 1\ \text{Ns}$

Der Impuls ist eine vektorielle Größe und hat die Richtung der Geschwindigkeit des bewegten Körpers. Hier wird aber nur mit dem Betrag des Impulses gerechnet.

Aus dem Grundgesetz der Dynamik folgt nun:

$$F = ma = m\frac{dv}{dt} \quad \text{oder} \quad F = \frac{d\,(mv)}{dt}$$

Die Gleichung bedeutet, daß sich der Impuls eines Körpers zeitlich ändert, wenn eine beschleunigende Kraft auf den Körper wirkt. Es sei nun wieder angenommen, daß das physikalische System abgeschlossen ist. Das heißt, es wirken keine äußeren Kräfte. Dann gilt:

$$\frac{d}{dt}(m \cdot v) = 0$$

Durch Integration erhält man die Gleichung $m \cdot v$ = konst.
Das ist der Satz von der Erhaltung des Impulses. Er wird im allgemeinen für ein System aus mehreren Körpern formuliert und lautet in vektorieller Schreibweise:

Impulserhaltungssatz	$\sum (m_k \cdot \vec{v}_k)$ = konst.

▶ In einem abgeschlossenen System ist die Summe der Impulse konstant.

Der Impulserhaltungssatz findet viele Anwendungen in der Technik. Besondere Bedeutung hat er in der Raketentechnik.

Lehrbeispiel:

Ein Gewehr und das entsprechende Geschoß haben die Masse von 4 kg bzw. 0,01 kg. Das Geschoß erhält eine Anfangsgeschwindigkeit von 900 m/s. Welche Geschwindigkeit würde das Gewehr durch den Rückstoß bekommen, wenn es frei beweglich wäre? (vgl. Abb. 27.2.)

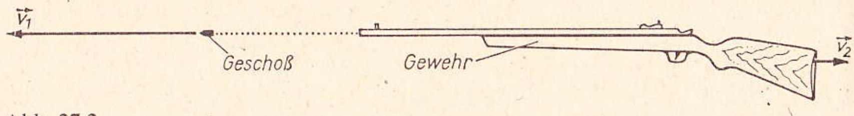


Abb. 27.2.

S_1 gegeben:
$m_2 = 4$ kg, $m_1 = 0{,}01$ kg; $v_1 = 900$ m/s
gesucht:
Geschwindigkeit des Gewehres v_2

S_2 Für das abgeschlossene System ‚Geschoß und Gewehr'

S_3 ist der Gesamtimpuls vor und nach dem Schuß gleich null.

Dann gilt:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = 0$$

$$v_2 = -\frac{m_1 \cdot v_1}{m_2} = -\frac{0{,}01\ \text{kg} \cdot 900\ \text{ms}^{-1}}{4\ \text{kg}} = -2{,}25\ \text{ms}^{-1}$$

S_4 Das Gewehr würde eine Geschwindigkeit von 2,25 ms^{-1} erhalten. Die Richtung von v_2 ist der von v_1 entgegengesetzt.

Die Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen haben eine besondere Bedeutung bei der Beschreibung der objektiven Realität. Man kann die Erkenntnisse über die Erhaltungssätze auf der Basis des dialektischen Materialismus verallgemeinern und interpretieren. Danach ist die Materie und ihre Bewegung in Raum und Zeit unerschaffbar und unzerstörbar. Diese Erkenntnis wurde schon von *F. Engels* ausgesprochen und wird durch die Erhaltungssätze bestätigt.

Wortliste zum Text

die Abnahme, -n
aus/sprechen A
sprach aus, ausgesprochen
dialektisch
der Energieerhaltungssatz
die Energieform, -en
Engels, Friedrich
die Erhaltungsgröße, -n
der Erhaltungssatz, ¨-e
der Gesamtimpuls, -e
das Geschoß, Geschosse
das Gewehr, -e
die Glasplatte, -n
der Impuls, -e
der Impulserhaltungssatz
die Raketentechnik, o.
objektive Realität
der Rückstoß,
die Schreibweise, -n
unerschaffbar
unzerstörbar
die Zunahme

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einem abgeschlossenen physikalischen System?
2) Nennen Sie einige Erhaltungsgrößen der Physik!
3) Unter welcher Bedingung entsteht potentielle Energie?
4) Formulieren und interpretieren Sie den Energieerhaltungssatz der Mechanik!
5) Definieren Sie den Begriff Impuls!
6) Formulieren und interpretieren Sie den Impulserhaltungssatz!
7) Welche philosophische Erkenntnis des dialektischen Materialismus wird durch den Energieerhaltungssatz bestätigt?

2. Übungen zum Text

2.1. Mechanische Energie

Konsekutivsatz

Ergänzen Sie die Sätze mit Hilfe der Wortgruppen durch Konsekutivsätze!

(1) Die mechanische Energie bleibt in einem abgeschlossenen mechanischen System zeitlich konstant, ...
(2) An einem Körper wird Verschiebungsarbeit verrichtet, ...
(3) Eine Feder entspannt sich, ...
(4) Ein Körper wird beschleunigt, ...
(5) Ein Auto wird gebremst, ...

potentielle Energie nimmt ab
kinetische Energie nimmt zu
einen Erhaltungssatz formulieren können
mechanische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt
potentielle Energie nimmt zu

2.2. Energieerhaltungssatz der Mechanik

Angabe eines Grundes

2.2.1. *Begründen Sie den Wahrheitswert folgender Aussagen!*

(1) In einem abgeschlossenen System bleiben die kinetische und die potentielle Energie konstant, wenn nur mechanische Vorgänge stattfinden.
(2) Kinetische und potentielle Energie können ineinander umgewandelt werden.
(3) Wenn das System nicht abgeschlossen wäre, würde die Gesamtenergie nicht konstant bleiben.
(4) Durch Verrichtung von Arbeit an einem System kann seine Gesamtenergie verändert werden.
(5) Wenn sich die kinetische Energie eines abgeschlossenen mechanischen Systems* verringert, vergrößert sich die potentielle Energie des Systems.

2.2.2. *Beschreiben Sie die Energieumwandlungen*, die stattfinden, wenn eine vollkommen elastische Stahlkugel auf eine vollkommen elastische Glasplatte fällt!

* Ein mechanisches System ist ein System, in dem nur mechanische Vorgänge stattfinden.

2.3. Impuls und Impulserhaltungssatz

Ergänzen Sie den Text!

Die physikalische Größe Impuls beschreibt den .... eines Körpers. Weil sie eine Richtung hat, ist sie eine .... Jeder Körper, der eine .... hat, hat einen Impuls. In einem abgeschlossenen System bleibt der Gesamtimpuls .... Er ist also eine .... Wenn in einem abgeschlossenen System ein Impuls in einer gegebenen Richtung erzeugt wird, entsteht ein gleich großer .... in der entgegengesetzten Richtung.

vektoriell
Geschwindigkeit
Größe
Bewegungszustand
Erhaltungsgröße
Gegenimpuls
konstant

2.4. Energie und Arbeit

Konjunktiv

2.4.1. *Ergänzen Sie die Sätze!*

Der Lehrer hat uns erläutert, daß
(1) die potentielle Energie eines Systems zunehmen würde, wenn ....
(2) die kinetische Energie eines Fahrzeuges abnehmen würde, wenn ....
(3) die Gesamtenergie dieses Systems konstant sei, weil ....
(4) dieses System mechanische Arbeit verrichten würde und daß deshalb ....
(5) beim freien Fall ständig potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt würde, daß aber ....
(6) die kinetische Energie eines Körpers dadurch erhöht werden könnte, daß ....

2.4.2. *Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

Angabe eines Grundes

(1) Ein Körper, der mechanische Energie besitzt, kann Arbeit verrichten.
(2) Jeder Körper, der mechanische Energie besitzt, verrichtet mechanische Arbeit.
(3) Jeder Körper, der mechanische Arbeit verrichten kann, besitzt potentielle Energie.
(4) Ein Körper, der kinetische Energie besitzt, kann mechanische Arbeit verrichten.

3. Übungen zum Thema

3.1. Zusammenhang von Energie und Arbeit

3.1.1. *Definieren Sie* die Begriffe Energie und Arbeit!

3.1.2. *Unterscheiden Sie* die Begriffe Energie und Arbeit, und *erläutern Sie* ihren Zusammenhang!

3.1.3. *Sprechen Sie* über die Verwendung der Begriffe Energie und Arbeit in der Wärmelehre und in der Elektrik!

3.2. Erhaltungssätze

3.2.1. *Stellen Sie fest*, an welchen Stellen dieses Buches schon Erhaltungssätze formuliert wurden, und *erläutern Sie* den Zusammenhang dieser Erhaltungssätze mit dem allgemeinen Energieerhaltungssatz!

3.2.2. *Erläutern Sie* am Beispiel des Raketenantriebs die Bedeutung des Impulserhaltungssatzes für die Beschleunigung von Körpern!

3.2.3. *Beschreiben Sie* ein Experiment, mit dem man den Impulserhaltungssatz nachweisen kann! Informieren Sie sich in einem Lehrbuch!

3.3. Bedeutung von Bezugssystemen

Zeigen Sie, daß folgende Größen vom Bezugssystem abhängen!

(1) kinetische Energie;
(2) potentielle Energie;
(3) Impuls

3.4. Energieumwandlungen

um/wandeln A in A

Beantworten Sie die folgenden Fragen in vollständigen Sätzen!

(1) In welche Energie wird die Wärmeenergie durch Wärmekraftmaschinen umgewandelt?
(2) Bei welcher Bewegung wird potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt?
(3) Welche Energieumwandlungen gibt es
(a) beim Anfahren einer Straßenbahn, (b) beim Anfahren eines PKW, (c) beim Bremsen eines Fahrzeugs und (d) beim Einspannen einer Feder?
(4) Wodurch kann man mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln?

4. Textaufgaben

164. Aus welcher Höhe muß sich der Körper K bewegen, damit er im Punkt A nicht senkrecht nach unten fällt, sondern auf der Bahn bleibt?

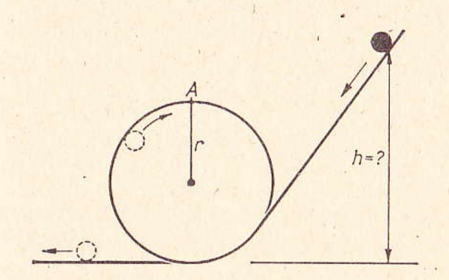


Abb. 27.3.

165. Ein Eisenbahnwagen hat die Masse $m = 5$ t und fährt mit einer Geschwindigkeit von 60 km h^{-1}. Wie groß ist seine kinetische Energie?

166. Aus welcher Höhe ist ein Körper frei gefallen, wenn er am Boden einen Impuls von 100 kg ms^{-1} und die kinetische Energie 500 Ws hat?

***167.** Durch schnelle Entspannung der Feder werden die beiden Körper mit den Massen $m_1 = 120$ g und $m_2 = 300$ g in entgegengesetzter Richtung bewegt. Welche Geschwindigkeit v_1 bzw. v_2 erhalten sie, wenn die Feder eine Energie von 4,9 Nm abgibt?
(Anleitung: Verwenden Sie den Energieerhaltungssatz und den Impulserhaltungssatz!)
Welche Geschwindigkeit erhält man, wenn
a) der Körper m_1 oder b) der Körper m_2 festgehalten werden?

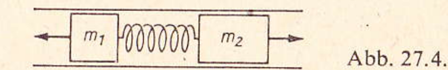


Abb. 27.4.

Zusammenfassende Übungen zur Mechanik

Zur Grammatik

1. Angabe eines Grundes

1.1. Zusammenstellung der Grammatik

Die Frage nach einem Grunde ist **„warum?“**, **„weshalb?“** oder **„aus welchem Grunde?“**.

► Warum (weshalb, aus welchem Grunde) ist die gleichförmige Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn eine beschleunigte Bewegung?

Die Angabe eines Grundes kann erfolgen

(1) durch einen Kausalsatz mit **„weil“** oder **„da“**.

► Weil (da) sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit ständig ändert, ist die gleichförmige Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn eine beschleunigte Bewegung.

(2) durch eine präpositionale Wortgruppe (vgl. S. 179).

► **Wegen** der Richtungsänderung der Bahngeschwindigkeit ist diese Bewegung eine beschleunigte Bewegung.

(3) mit **„aus diesem Grunde“** oder **„deshalb“** im folgenden Satz.

► Die Richtung der Bahngeschwindigkeit ändert sich ständig. Aus diesem Grunde (deshalb) ist die gleichförmige Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn eine beschleunigte Bewegung.

1.2. Übungen

1.2.1. *Beantworten Sie die Fragen in der entsprechenden grammatischen Form!* Verwenden Sie dabei alle angegebenen Möglichkeiten für die Angabe eines Grundes!

(1) Warum (weshalb, aus welchem Grunde) ist eine mechanische Bewegung stets eine relative Bewegung?
(2) Warum kann eine Punktmasse nicht rotieren?
(3) Warum ist der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung?
(4) Warum ist der senkrechte Wurf eine zusammengesetzte Bewegung?
(5) Warum muß die Kraft als vektorielle Größe betrachtet werden?
(6) Warum bewegt sich eine Punktmasse tangential zur Kreisbahn, wenn die Radialkraft null wird?
(7) Warum ist das Gewicht eines Körpers auf dem Mond kleiner als auf der Erde?

(8) Warum kann der mechanische Wirkungsgrad nicht größer als 1 sein?
(9) Warum ist der Gesamtimpuls eines beliebigen mechanischen Systems im allgemeinen nicht konstant?

1.2.2. *Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!* Verwenden Sie dabei alle unter 1.1. angegebenen Möglichkeiten zur Angabe eines Grundes!

(1) Bei jeder gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit $\vec{v}$ konstant.
(2) Der senkrechte Wurf nach oben ist eine zusammengesetzte Bewegung.
(3) Bei einer beschleunigten Bewegung haben Geschwindigkeit und Beschleunigung stets die gleiche Richtung.
(4) Mit Hilfe der Kraft kann man den Gleichgewichtszustand jedes Körpers vollständig beschreiben.
(5) Die Arbeit im Gravitationsfeld ist von der Form des Weges unabhängig.
(6) Jeder Körper, der mechanische Energie besitzt, verrichtet mechanische Arbeit.

2. Erweitertes Attribut

2.1. Zusammenstellung der Grammatik

Einfaches Attribut

► der drehbare Körper (Adjektiv)
► die sich bewegende Punktmasse (Part. I)
► die beschleunigte Punktmasse (Part. II)

Erweitertes Attribut

► der um eine Achse drehbare Körper
► die sich auf einer Kreisbahn bewegende Punktmasse
► die durch eine Kraft beschleunigte Punktmasse

Das erweiterte Attribut wird im Mündlichen oft durch einen Nebensatz ersetzt:

► Der Körper, der um eine Achse drehbar ist, ...
► Die Punktmasse, die sich auf einer Kreisbahn bewegt, ...
► Die Punktmasse, die durch eine Kraft beschleunigt wird, ...

2.2. Übungen

Vervollständigen Sie die Sätze, und unterstreichen Sie das erweiterte Attribut! Ersetzen Sie dann das erweiterte Attribut durch einen Nebensatz!

(1) Die für die kinematische Beschreibung einer Bewegung notwendigen physikalischen Größen sind ....

(2) Die für die Kreisbewegung charakteristischen physikalischen Größen sind ....

(3) Für die Erklärung des Kraftbegriffs kann man die durch Kräfte bewirkte .... eines Körpers verwenden.

(4) Die zur Beschreibung des statischen Gleichgewichtes notwendigen physikalischen Größen sind die .... und das ....
....

(5) Für die Dynamik wichtige physikalische Größen ....
....

(6) Das von *Newton* entdeckte Grundgesetz der Dynamik lautet ....
....

(7) Das aus dem Grundgesetz der Dynamik gefolgerte Trägheitsgesetz lautet in Worten: ....
....
....

(8) Der Betrag der nur in beschleunigten Bezugssystemen auftretenden Trägheitskraft ist gleich ....
....

(9) Die Richtung der nur vom mitbewegten Beobachter festgestellten Trägheitskraft in beschleunigten Systemen ist ....
....

(10) Die zum Zentrum gerichtete Radialkraft hat einen Betrag von ....
....

(11) Das für die Erklärung der Planetenbewegung wichtige Gravitationsgesetz wurde von .... entdeckt und lautet in mathematischer Form: ....

(12) Die von *Cavendish* bestimmte Gravitationskonstante hat einen Wert von ....

(13) Die durch eine Kraft verrichtete Verschiebungsarbeit berechnet man nach der Formel ....

(14) Die von der Geschwindigkeitsänderung abhängige Beschleunigungsarbeit berechnet man nach der Formel ....

(15) Jede in einem abgeschlossenen mechanischen System auftretende Vergrößerung der kinetischen Energie hat eine äquivalente Abnahme der .... zur Folge.

(16) Der in einem abgeschlossenen System konstante Gesamtimpuls ist gleich der .... der einzelnen ....

Zu Wortschatz und Wortbildung

1. Zusammengesetzte Substantive

1.1. *Bilden Sie* aus den folgenden Wörtern *zusammengesetzte Substantive* mit „Kraft“ oder „Gravitation“! *Sprechen Sie* über die Bedeutung der neuen Begriffe!

Anziehung, Feld, schwer, fliehen, Gesetz, Feder, Feldstärke, radial, Trägheit, Konstante

1.2. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

Was versteht man unter

Momentangeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Bahngeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit, Radialbeschleunigung, Fallbeschleunigung?

2. Substantive auf -ung

Beantworten Sie die folgenden Fragen! Verwenden Sie in den Antworten die zu den Substantiven auf -ung gehörenden Verben!

(1) Welche Entdeckung machte *Newton* bezüglich der Ursache der Bewegungsänderung?
(2) Welche Kraft wirkt bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung?
(3) Welche Wirkung hat in einem abgeschlossenen mechanischen System die Änderung der potentiellen Energie?
(4) Was wissen Sie über die Überlagerung von zwei Teilbewegungen?

3. Substantive und Adjektive

Ordnen Sie den Substantiven entsprechende Adjektive *zu*, und *sagen Sie*, was man unter dem Begriff versteht!

Substantive: Wurf, Realität, Widerspruch, System, Fall, Hebel, Koordinatensystem, Bewegung

Adjektive: kartesisch, frei, senkrecht, zweiseitig, gleichförmig, objektiv, dialektisch, heliozentrisch

4. Wörter in antonymischer Bedeutung

Nennen Sie zu den folgenden Wörtern Antonyme, und *erläutern Sie* den Gegensatz an einem Beispiel!

Beschleunigung, Zusammensetzung, Widerlegung, Energieaufnahme

5. Wörter in synonymischer Bedeutung

Nennen Sie zu den folgenden Wörtern Synonyme, und *erläutern Sie* die Begriffe!

Zentrifugalkraft, Radialkraft, Massenanziehung, Drehbewegung

6. Ordnen von Begriffen

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach physikalischen Größen, Modellen, Geräten und Prozessen!

Drehung, Hebel, Punktmasse, Impuls, Energie, lose Rolle, Massenmittelpunkt, Gewicht, Dehnung, Drehmoment, starrer Körper, Kraft

Schwingungen und Wellen

28. Mechanische Schwingungen

In der Natur und Technik kann man Vorgänge beobachten, die durch eine zeitlich periodische Änderung physikalischer Größen gekennzeichnet sind. Diese Vorgänge bezeichnet man als Schwingungen. Beispiele für mechanische Schwingungen sind die periodischen Bewegungen von Pendeln, Stäben und Flüssigkeiten.

28.1. Grundbegriffe der mechanischen Schwingung

Es soll zunächst das mechanische System des horizontalen Federschwingers beschrieben werden. Damit eine Schwingung entsteht, führt man dem System eine bestimmte Energie zu, indem man gegen die Federkraft eine Federspannarbeit verrichtet. Dabei wird der Körper mit der Masse m aus der Nullage $x_0 = 0$ bis zum Ort $x = -x_M$ gebracht.

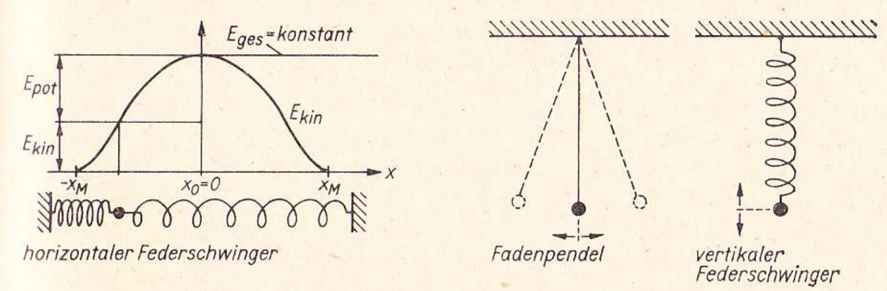


Abb. 28.1. Beispiele für schwingungsfähige Systeme

Diesem Ort entspricht in bezug auf die Nullage eine potentielle Energie von $W_{pot} = \frac{k}{2} x_M^2$. Infolge der rücktreibenden Federkraft bewegt sich der Körper in Richtung zur Nullage. Die potentielle Energie nimmt ab, während die kinetische Energie zunimmt. Während der Bewegung des Körpers durch die Nullage hat die kinetische Energie ein Maximum, und die potentielle Energie ist null. Auf Grund der Trägheit bewegt sich der Körper über die Nullage hinaus und erreicht bei Vernachlässigung der Reibung den Ort $x = x_M$. Für diesen Ort ist die kinetische Energie null und die potentielle Energie ein Maximum. Infolge der rücktreibenden Kraft und der Trägheit gelangt der Körper wieder bis zum Ort $x = -x_M$.

Damit hat der Körper eine volle Schwingung ausgeführt. Der Schwingungsvorgang wiederholt sich. Dabei werden potentielle und kinetische Energie periodisch ineinander umgewandelt.
Verallgemeinernd kann man feststellen:

▶ Eine mechanische Schwingung ist ein Vorgang, bei dem sich mechanische Energie zeitlich periodisch ändert.
Eine mechanische Schwingung entsteht, wenn ein schwingungsfähiges System vorhanden ist und man diesem System eine Energie zuführt.

Physikalische Größen, die man zur Beschreibung mechanischer Schwingungen verwendet, nennt man Kenngrößen einer mechanischen Schwingung.

Kenngröße	Formelzeichen	Erläuterung
Elongation	x	Die Elongation ist der Momentanwert der sich periodisch ändernden mechanischen Größe, z. B. die momentane Auslenkung aus der Nullage.
Amplitude	x_M	Die Amplitude ist der Maximalwert der sich zeitlich periodisch ändernden mechanischen Größe, z. B. die maximale Auslenkung aus der Nullage.
Frequenz	f	Die Frequenz ist der Quotient aus der Anzahl der Schwingungen und der Zeit. Die Einheit der Frequenz ist das Hertz: $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.
Schwingungsdauer (Periode)	T	Die Schwingungsdauer ist die Zeit für eine volle Schwingung.

Mechanische Schwingungen kann man in bezug auf ihre Ursache in elastische Schwingungen und Pendelschwingungen einteilen. Federschwingungen, Längs- und Querschwingungen von Stäben und Schwingungen von Platten sind Beispiele für elastische Schwingungen. Die Schwingungen entstehen durch die elastischen Eigenschaften der Stoffe. Im Gegensatz dazu entstehen Pendelschwingungen unter dem Einfluß der Schwerkraft, während beim vertikalen Federschwinger sowohl Federkraft als auch Schwerkraft wirken.
In der Praxis gibt es keine mechanischen Schwingungen ohne Reibung. Die Wirkung der Reibung kann man mit Hilfe der Amplitude beschreiben. Führt man einem schwingungsfähigen System einmalig eine bestimmte Energie zu, so kann man beobachten, daß die Amplituden der Schwingung mit der Zeit immer kleiner werden. Das System gibt infolge der Reibung die zugeführte Energie in Form von

Wärmeenergie ab. Die Schwingung ist gedämpft. Ungedämpfte Schwingungen erhält man, indem man dem System periodisch so viel Energie zuführt, wie durch Reibung verloren geht.

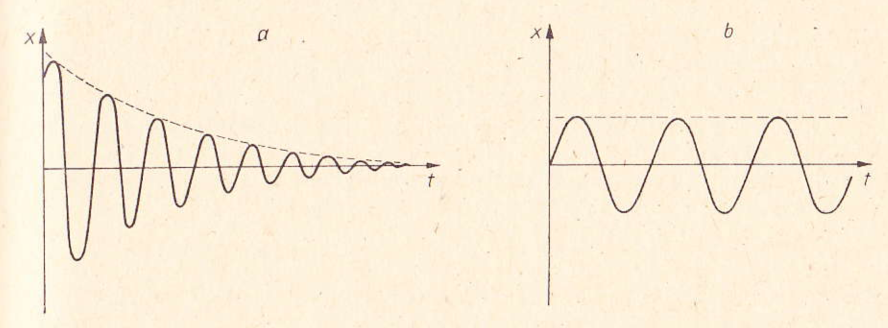


Abb. 28.2. Darstellung einer gedämpften (a) und einer ungedämpften (b) Schwingung

28.2. Die harmonische Schwingung

Es gibt Schwingungen, deren Elongation mathematisch durch eine Sinus- oder Kosinusfunktion darstellbar ist. Man definiert deshalb:

▶ Eine Schwingung, deren Elongation durch eine Sinus- oder Kosinusfunktion darstellbar ist, nennt man harmonische Schwingung.

Zur Herleitung der darstellenden Funktion betrachtet man einen Körper mit der Masse m, der eine gleichförmige Kreisbewegung ausführt. Die Masse bewegt sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω auf einer Kreisbahn mit dem Radius $r = x_M$. Die Projektion dieser Bewegung auf die x-Achse ist eine sich zeitlich periodisch ändernde physikalische Größe, d. h. die x-Komponente des Drehradius $r = x_M$ führt eine Schwingung aus.
Es gilt: $x = x_M \cos \omega t$ mit $\varphi = \omega t$.

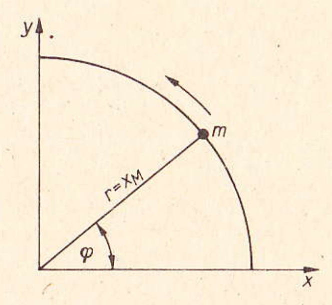


Abb. 28.3. Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn

Für die Elongation einer harmonischen Schwingung erhält man die allgemeine Darstellung

$x = x_M \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$ oder $x = x_M \sin(\omega t + \varphi_0)$

In diesen Funktionsgleichungen ist x die Elongation, x_M die Amplitude und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz. Der Momentanwert von x wird durch die Phase $(\omega t + \varphi_0)$ bestimmt. Die Phase wird auch als Phasenwinkel bezeichnet. φ_0 nennt man Phasenkonstante.
Mit Hilfe der Funktionsgleichungen kann man die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung a der harmonischen Schwingung berechnen:

$$v = \dot{x} = -x_M \cdot \omega \cdot \sin \omega t; \qquad a = \ddot{x} = -x_M\omega^2 \cdot \cos \omega t$$

Aus den Gleichungen für die Elongation und die Beschleunigung folgt die Schwingungsgleichung der harmonischen Schwingung:

Schwingungsgleichung der harm. Schwingung	$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$

Lehrbeispiel:

Es ist zu zeigen, daß der Federschwinger (vgl. 28.1.) harmonische Schwingungen ausführt!

S_1: Wenn der Federschwinger harmonische Schwingungen ausführt, so muß für ihn die Schwingungsgleichung gelten.
Es ist bekannt, daß für den Federschwinger das *Hooke*sche Gesetz gilt.

S_2: Für die rücktreibende Kraft gilt: $F = -k \cdot x$. Außerdem gilt allgemein $F = m \cdot a$.

S_3: Es folgt: $m\ddot{x} = -kx$ und damit $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$

S_4: Ein Vergleich von $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$ und $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ zeigt, daß der Federschwinger eine harmonische Schwingung ausführt, wobei $\omega^2 = \frac{k}{m}$ gilt.
Wenn F nicht proportional zu x ist, so gilt auch die Schwingungsgleichung nicht.

Durch dieses Beispiel erhält man eine allgemeine Bedingung für jede harmonische Schwingung:

► Harmonische Schwingungen sind gekennzeichnet durch eine Kraft, die der Elongation proportional und zur Nullage gerichtet ist.

Man kann zeigen, daß diese Definition äquivalent zur ersten Definition der harmonischen Schwingung ist.
Aus den Definitionen folgt, daß ein Fadenpendel nur dann harmonisch schwingt, wenn die Amplituden klein sind und der schwingende Körper als Punktmasse und der Faden als masselos angenommen werden können.
Die Periode einer harmonischen Schwingung folgt aus der Schwingungsgleichung:

Periode einer Federschwingung	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Periode einer Pendelschwingung	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

28.3. Zusammensetzung von Schwingungen

Führt ein Körper gleichzeitig zwei Schwingungen aus, so überlagern sich die beiden Schwingungen. Es entsteht eine resultierende Bewegung des Körpers. Sind die Frequenzen f_1 und f_2 der Teilschwingungen gleich und stimmen die Schwingungsrichtungen ebenfalls überein, so erhält man die resultierende Schwingung, wenn man die einzelnen Elongationen addiert.

Aus der Abbildung 28.4. erkennt man, daß zwei Schwingungen mit $x_{M1} = x_{M2}$, $f_1 = f_2$ und der Phasendifferenz $\Delta\varphi = \pi$ einander auslöschen.

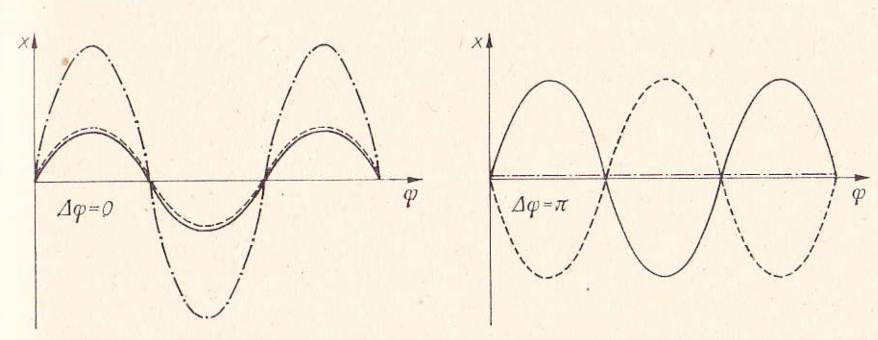


Abb. 28.4. Überlagerung gleichgerichteter Schwingungen gleicher Frequenz

28.4. Erzwungene Schwingungen und Resonanz

Entsprechend der Energiezufuhr unterscheidet man freie Schwingungen und erzwungene Schwingungen. Ein schwingungsfähiges System führt freie Schwingungen aus, wenn ihm einmalig Energie zugeführt wird. Es treten Eigenschwingungen mit einer Eigenfrequenz f_0 auf.
Führt man dagegen einem schwingungsfähigen System periodisch Energie zu, so treten erzwungene Schwingungen auf. In diesem Fall erfolgt die Erregung eines Systems (Resonator) durch ein zweites schwingungsfähiges System (Erreger).

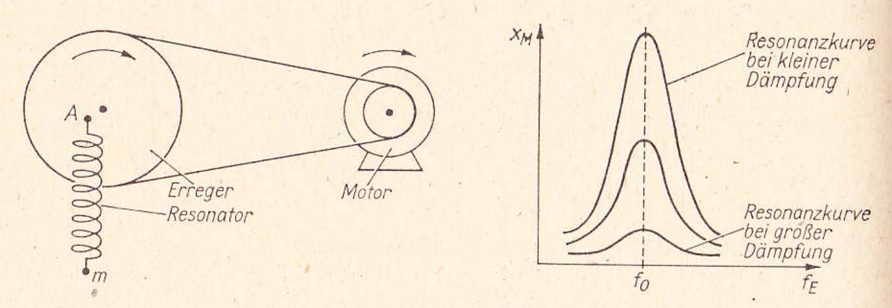


Abb. 28.5. Erzwungene Schwingung und Resonanz

Infolge der Drehung des Erregers führt der Aufhängepunkt A eine periodische Bewegung aus. Da der Resonator in A befestigt ist, sind Erreger und Resonator gekoppelt, d. h., dem Resonator kann durch den Erreger periodisch Energie zugeführt werden. Die Amplituden der erzwungenen Schwingung sind abhängig von dem Verhältnis zwischen Eigenfrequenz f_0 des Resonators und der Erregerfrequenz f_E des Erregers. Außerdem hängen sie von der Dämpfung ab. Je geringer der Unterschied zwischen den Frequenzen und je kleiner die Dämpfung ist, desto größer sind die Amplituden der erzwungenen Schwingung. Resonanz tritt auf, wenn $f_0 = f_E$ gilt. Im Resonanzfall kann es bei fehlender Dämpfung zur Zerstörung des Systems kommen.

Wortliste zum Text

die Amplitude, -n
die Auslenkung, -en
aus/löschen A
befestigen A
dämpfen A
der Drehradius, Drehradien
die Eigenfrequenz, -en
die Eigenschwingung, -en
einmalig
ein/teilen A in A
die Elongation, -en
die Erläuterung, -en
der Erreger, -
die Erregerfrequenz, -en
erzwingen A
erzwang, erzwungen

der Federschwinger, -
die Frequenz, -en
gleichgerichtet
harmonisch
das Hertz, - (Einheit)
horizontal
die Kenngröße, -n
koppeln A
der Kosinus, -
die Kreisfrequenz, -en
die Längsschwingung, -en
der Maximalwert, -e
der Momentanwert, -e
die Nullage, -n
die Pendelschwingung, -en
die Periode, -n
die Phase, -n
die Phasenkonstante, -n
der Phasenwinkel, -
die Projektion, -en
die Querschwingung, -en
die Resonanz, -en
der Resonanzfall, ¨-e
der Resonator, -en
resultieren aus D
rücktreibend
die Schwingung, -en
die Schwingungsdauer, o.
schwingungsfähig
der Schwingungsvorgang, ¨-e
die Teilschwingung, -en
das Verhältnis, -se
vertikal
zu/nehmen
nahm zu, zugenommen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einer mechanischen Schwingung?
2) Unter welchen Bedingungen entsteht eine Schwingung?
3) Welche physikalischen Größen dienen zur Beschreibung mechanischer Schwingungen, und wie sind sie definiert?
4) Wodurch unterscheiden sich elastische Schwingungen von Pendelschwingungen?
5) Welcher Unterschied besteht zwischen gedämpften und ungedämpften Schwingungen?
6) Wie erhält man ungedämpfte Schwingungen?
7) Wie kann man eine harmonische Schwingung definieren?
8) Mit welcher Gleichung beschreibt man eine harmonische Schwingung?
9) Wie erhält man bei der Überlagerung von zwei Schwingungen die resultierende Schwingung?
10) Was versteht man unter der Eigenfrequenz f_0 eines Systems?
11) Unter welcher Bedingung führt ein System erzwungene Schwingungen aus?
12) Wovon hängt die Amplitude einer erzwungenen Schwingung ab?
13) Unter welcher Bedingung tritt Resonanz auf?
14) Nach welchen Formeln berechnet man die Schwingungsdauer beim Federschwinger und beim Pendel?

2. Übungen zum Text

2.1. Mechanische Schwingungen und ihre Kenngrößen

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Vorgänge, bei denen sich physikalische Größen zeitlich periodisch ändern, nennt man .... Mit Hilfe der .... kann man eine mechanische Schwingung beschreiben. Die .... ist der Maximalwert der sich zeitlich periodisch ändernden physikalischen Größe. Die .... ist der Momentanwert dieser Größe. Beim Federschwinger ist die Elongation gleich der momentanen .... der schwingenden Masse aus ihrer .... Der Quotient aus der Zahl der Schwingungen und der dazugehörigen Zeit heißt die .... Die .... ist die Dauer einer vollen Schwingung.

Amplitude
Schwingung
Elongation
Kenngröße
Auslenkung
Frequenz
Schwingungsdauer
Nullage

2.1.2. *Was bedeuten die folgenden Aussagen?*

Eine physikalische Größe ändert sich zeitlich.
Eine physikalische Größe ändert sich zeitlich periodisch.
Ein mechanisches System schwingt.
Eine Schwingung hat eine Frequenz von 50 Hz.
Eine Schwingung hat eine Periode von 2 s.

2.2. Arten der mechanischen Schwingung

Unterscheiden Sie!

Antonyme

harmonisch / nichtharmonisch (Schwingung)
elastisch / unelastisch (Schwingung)
gedämpft / ungedämpft (Schwingung)

2.3. Überlagerung von Schwingungen

sich überlagern, sich zusammen/setzen aus A

Ergänzen Sie den folgenden Text!

Schwingungen können .... Zwei Schwingungen eines Körpers ...., wenn sie gleichzeitig ablaufen. Bei einer .... Schwingung ist die Elongation unter bestimmten Voraussetzungen gleich der Summe der Einzelelongationen.

Die Bewegung einer in einer Kreisebene schwingenden Masse kann als .... Schwingung betrachtet werden. Diese Schwingung .... aus zwei zueinander senkrechten Schwingungen .... Komplizierte Schwingungen lassen sich oft aus einfachen Schwingungen ....

sich überlagern

sich zusammensetzen

2.4. Schwingung und Frequenz

zusammengesetzte Substantive

Definieren Sie folgende Begriffe!

Schwingung: Federschwingung, Pendelschwingung, Sinusschwingung, Längsschwingung
Frequenz: Eigenfrequenz, Kreisfrequenz, Erregerfrequenz
Schwingungs-: Schwingungsdauer, Schwingungsvorgang, Schwingungsgleichung

2.5. Mechanische Schwingung und ihre Ursache

Angabe eines Grundes

Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!

Jedes mechanische System, dem man Energie zuführt, beginnt zu schwingen.
Jedes mechanische System, das schwingt, besitzt mechanische Energie bezüglich der Nullage.
Ein schwingendes Fadenpendel besitzt in jeder Lage potentielle und kinetische Energie.
Beim vertikalen Federschwinger ist die rücktreibende Kraft die Ursache für die Bewegung der Masse über die Nullage hinaus.

2.6. Harmonische Schwingungen

2.6.1. *Beantworten Sie folgende Fragen in vollständigen Sätzen!* Beachten Sie die grammatische Form der Fragestellung!

(1) Warum erhält man bei der Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung auf einen Durchmesser eine Schwingung?
(2) Wie kann man eine harmonische Schwingung mathematisch beschreiben?
(3) Wie kann man mit Hilfe des Kraftbegriffes die harmonische Schwingung definieren?
(4) Warum führt der vertikale Federschwinger harmonische Schwingungen aus?
(5) Unter welcher Bedingung führt das mathematische Pendel harmonische Schwingungen aus?

2.6.2. *Sprechen Sie* zum Thema „Die harmonische Schwingung"! Verwenden Sie dazu Übung 2.6.1.!

2.7. Erzwungene Schwingung

2.7.1. *Beantworten Sie folgende Fragen!*

(1) Unter welchen Bedingungen führt ein System erzwungene Schwingungen aus?
(2) Wovon ist die Amplitude einer erzwungenen Schwingung abhängig?
(3) Unter welcher Bedingung tritt Resonanz auf?
(4) Welche Folgen hat der Resonanzfall bei fehlender Dämpfung für das System?

2.7.2. *Sprechen Sie zum Thema „Die erzwungene Schwingung"!* Verwenden Sie dabei Übung 2.7.1.!

2.8. Vertikaler Federschwinger

2.8.1. *Beschreiben Sie die Entstehung einer Schwingung* und die Umwandlung von potentieller und kinetischer Energie ineinander am Beispiel des vertikalen Federschwingers!

2.8.2. *Vergleichen Sie* den vertikalen Federschwinger mit dem Fadenpendel bezüglich der Ursache der Schwingungen, der mathematischen Beschreibung sowie der Schwingungsdauer!

2.8.3. *Definieren Sie* am Beispiel des vertikalen Federschwingers die Begriffe Eigenfrequenz f_0, Erregerfrequenz f_E, und *erläutern Sie* den Unterschied zwischen der freien und der erzwungenen Schwingung!

3. Übungen zum Thema

3.1. Schwingungsdauer beim mathematischen Pendel und beim Federschwinger

Sprechen Sie in einem Kurzvortrag über folgende Themen!

(1) Herleitung der Schwingungsdauer beim mathematischen Pendel
(2) Herleitung der Schwingungsdauer für den vertikalen Federschwinger
Hinweis: Gehen Sie dabei von der Beschreibung eines schwingungsfähigen Systems aus. Begründen Sie notwendige Voraussetzungen (Annahmen), und leiten Sie mathematisch die Schwingungsdauer her!

3.2. Mathematische Beschreibung der harmonischen Schwingung

3.2.1. *Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!* (vgl. S. 29)

(1) $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ (3) $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

(2) $x = x_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$ (4) $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

3.2.2. *Nennen Sie* Beispiele für schwingungsfähige Systeme! Welche Größen ändern sich zeitlich periodisch, wenn diese Systeme schwingen?

3.2.3. *Beschreiben Sie* am Beispiel eines schwingungsfähigen Systems den Zustand der Resonanz, und begründen Sie die Möglichkeit der Zerstörung des Systems im Resonanzfall (technische Bedeutung)!

4. Textaufgaben

168. Wie groß ist die Kreisfrequenz einer Schwingung, deren Schwingungsdauer 3,5 s beträgt?
169. Wieviel Schwingungen entsprechen einem Phasenwinkel von $\varphi = 26{,}8$ (Bogenmaß)?
170. Wie groß ist die Elongation eines harmonisch schwingenden Punktes 0,003 s nach Beginn der Schwingung aus der Ruhelage, wenn die Amplitude 3 cm und die Frequenz 25 Hz betragen? (Benutzen Sie die Gleichung $\varphi = \omega t = 2\pi f t$ und das Bogenmaß!)
171. Wieviel Sekunden nach dem Nulldurchgang beträgt die Elongation einer harmonischen Schwingung 15 mm, wenn die Amplitude $x_M = 2$ cm und die Frequenz $f = 50$ Hz sind?
172. Ein vertikaler Federschwinger hat die Federkonstante $k = 245{,}2$ mN/cm. Welche Masse muß angehängt werden, damit er unter der Wirkung der Gewichtskraft in einer Minute 25 Schwingungen ausführt?

173. Ein Körper von 50 g Masse dehnt eine Schraubenfeder im Ruhezustand um 4 cm. Körper und Feder werden zu Schwingungen angeregt. Wie groß sind die Periode und die Frequenz dieser Schwingung? Wie groß ist der Phasenwinkel φ nach 5,5 s?

174. Welche Schwingungsdauer haben mathematische Pendel folgender Längen: a) 1 m b) 2 m c) 1 mm?

175. An einem Kran hängt ein Körper. Er führt in 25 Sekunden 2 Schwingungen aus. Wie lang ist das Seil?

176. Wie lang ist ein Pendel, das für eine Halbschwingung genau eine Sekunde benötigt?

177. Wieviel Schwingungen führt das in Abb. 28.6. dargestellte Pendel in einer Minute aus?

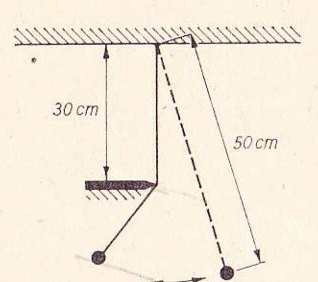


Abb. 28.6.

178. Um wieviel Prozent verkürzt sich die Schwingungsdauer eines mathematischen Pendels, wenn es um $\frac{1}{4}$ seiner Länge gekürzt wird?

29. Mechanische Wellen

29.1. Entstehung einer Welle

In der Abbildung 29.1. sind zwei gekoppelte Pendel dargestellt. Die Kopplung erfolgt durch einen Faden mit einem Massenstück G. Führt man dem Pendel A eine bestimmte Energie zu, so schwingt es. Nach einiger Zeit beginnt auf Grund der

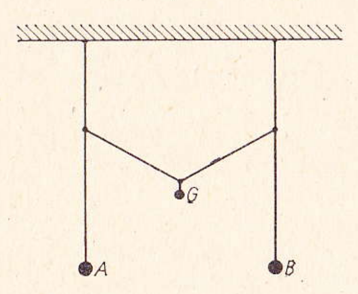


Abb. 29.1. Gekoppelte Pendel

Kopplung auch das Pendel B zu schwingen, d. h., es wurde vom Pendel A zum Schwingen angeregt. Das bedeutet, daß Energie von einem Pendel zum anderen übertragen wurde.
Wenn ein System von vielen gekoppelten schwingungsfähigen Körpern vorliegt und man diesem System Energie zuführt, so breitet sich die Erregung im ganzen System in Form einer Welle aus. Die einzelnen Körper beginnen zeitlich nacheinander zu schwingen. Dabei wird von Teilchen zu Teilchen Energie übertragen.

► Eine mechanische Welle ist ein Vorgang, bei dem Energie durch Kopplung schwingungsfähiger Teilchen übertragen wird. Dieser Vorgang wird durch sich räumlich und zeitlich periodisch ändernde Größen beschrieben.

Solche sich räumlich und zeitlich periodisch ändernde Größen sind z. B. Auslenkung, Geschwindigkeit, Druck, Dichte und Energie.
Damit eine mechanische Welle entstehen kann, müssen einige Bedingungen erfüllt sein. Es muß ein System schwingungsfähiger Teilchen – ein Medium – vorhanden sein, und die Teilchen des Mediums müssen durch elastische Kräfte gekoppelt sein. Die im Erregungszentrum erzeugte Schwingung breitet sich dann in Form einer Welle im Medium aus.

29.2. Die Kenngrößen einer Welle und die Wellengleichung

Die Kenngrößen einer Schwingung genügen nicht, um die Welle vollständig zu beschreiben. Spezifische Größen der Welle sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit c und die Wellenlänge λ. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Erregung als Welle im Medium ausbreitet.

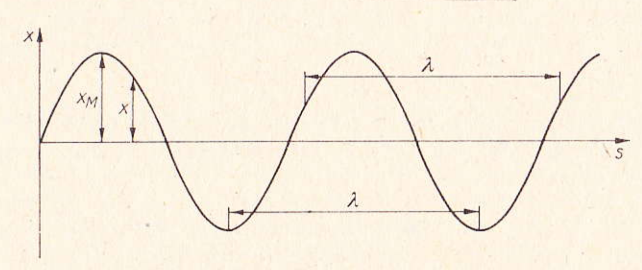


Abb. 29.2. Darstellung einer Welle im x-s-Diagramm

Die Wellenlänge λ ist der kleinste räumliche Abstand zweier Teilchen einer Welle, die phasengleich schwingen. Zwei Teilchen sind phasengleich, wenn sie die gleiche Elongation und die gleiche Schwingungsrichtung haben. Man sagt auch, daß sie den gleichen Schwingungszustand haben.
Zwischen den Größen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz besteht ein Zusammenhang. Wenn die schwingungsfähigen Teilchen eine volle

Schwingung ausgeführt haben, so hat die Welle die Strecke λ zurückgelegt. Für eine volle Schwingung benötigen die Teilchen die Zeit T. Es gilt $c = \frac{\lambda}{T}$ und damit die Grundgleichung der Wellenlehre:

Grundgleichung der Wellenlehre	$c = \lambda \cdot f$

Diese Gleichung gilt für alle Arten von Wellen.
Eine Welle ist harmonisch, wenn ihre Teilchen harmonisch schwingen. Wenn man die Elongation am Ort s zur Zeit t berechnen will, muß man beachten, daß dieses Teilchen erst nach der Zeit $t' = s/c$ mit seiner Schwingung begonnen hat.
Für seine Elongation gilt deshalb die Wellengleichung:

Wellengleichung	$x = x_M \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{s}{c}\right)\right]$

In dieser Gleichung sind x die Elongation, x_M die Amplitude, ω die Kreisfrequenz, t die Zeit, s der Abstand vom Erregungszentrum der Welle und c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Die Gleichung ist eine Ort-Zeit-Funktion und beschreibt einen räumlich und zeitlich periodischen Vorgang, eine harmonische Welle. Für einen bestimmten Zeitpunkt (t = konstant) ergibt sich, daß die Elongation x eine Funktion des Ortes s ist ($x = f(s)$). Dagegen erhält man für einen bestimmten Ort (s = konstant), daß die Elongation eine Funktion der Zeit ist ($x = f(t)$).
Die Wellengleichung ist ein mathematisches Modell, das für eine sehr große Anzahl von Wellen benutzt werden kann.

■ **Lehrbeispiel:**

Eine Welle hat die Amplitude 20 cm, die Ausbreitungsgeschwindigkeit 40 cm/s und die Frequenz 10 Hz. Nach welcher Zeit beträgt die Elongation 12 cm vom Erregerzentrum entfernt 15 cm?

S_1: Setzt man eine harmonische Welle voraus, so kann man zur Lösung des Problems die Wellengleichung benutzen.

gegeben:

$x_M = 20$ cm $s = 12$ cm

$c = 40$ cm/s $x = 15$ cm

$f = 10$ Hz

gesucht: t

S_2: $x = x_M \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{s}{c}\right)\right]$ und $\omega = 2\pi f$

S_3: $\frac{x}{x_M} = \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{s}{c}\right)\right]$

$$\arcsin\frac{x}{x_M} = 2\pi f\left(t - \frac{s}{c}\right)$$

$$\frac{2\pi f \cdot s}{c} + \arcsin\frac{x}{x_M} = 2\pi f \cdot t$$

$$\frac{s}{c} + \frac{1}{2\pi f}\arcsin\frac{x}{x_M} = t \qquad \text{allgemeines Ergebnis}$$

$t = 0{,}31$ s   spezielles Ergebnis

S_4: Nach $t = 0{,}31$ s beträgt die Elongation 12 cm vom Erregerzentrum entfernt 15 cm.

29.3. Wellenarten

In bezug auf die Schwingungsrichtung der Teilchen und die Ausbreitungsrichtung der Welle kann man zwei Wellenarten unterscheiden: die Transversalwellen und die Longitudinalwellen.

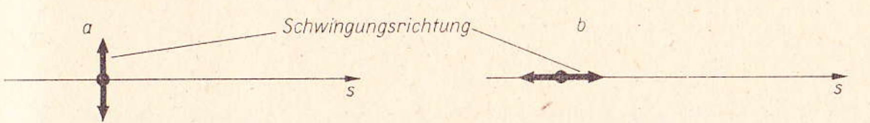


Abb. 29.3. Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung bei Transversalwellen (a) und Longitudinalwellen (b)

Bei einer Transversalwelle stehen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung senkrecht aufeinander (z. B. Seilwellen), während bei einer Longitudinalwelle Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung zusammenfallen (z. B. Schallwellen). Eine Einteilung der Wellen in bezug auf die Ausbreitung ergibt lineare Wellen (Ausbreitung längs einer Geraden), Oberflächenwellen (Ausbreitung auf der Oberfläche eines Körpers) und räumliche Wellen (Ausbreitung im Raum).

29.4. Das Huygenssche Prinzip

Wenn man einen Körper ins ruhende Wasser wirft, kann man beobachten, wie sich eine Welle kreisförmig ausbreitet. Man bezeichnet eine von einem Erregungszentrum sich ausbreitende Welle auch als Elementarwelle.
Wenn viele Punkte eines Mediums gleichzeitig erregt werden, so entstehen viele

Elementarwellen, und durch ihre Überlagerung entsteht eine gemeinsame Wellenfront. Dabei befinden sich alle Teilchen einer Wellenfront in gleicher Schwingungsphase. Der Energietransport erfolgt senkrecht zu den Wellenfronten. Die Richtung des Energietransportes kennzeichnet man durch die Wellennormale. Sie steht senkrecht auf der Wellenfront.

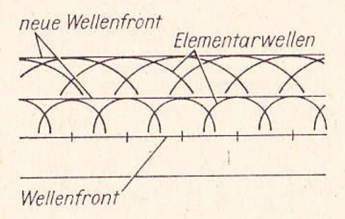


Abb. 29.4. Zum *Huygens*schen Prinzip

Der niederländische Physiker *Christian Huygens* (1629–1695) entwickelte ein Prinzip, mit dem man viele Welleneigenschaften erklären kann.

► Jeder Punkt eines Mediums, der von einer Welle getroffen wird, sendet eine kreis- bzw. kugelförmige Elementarwelle aus. Die gemeinsame Berührungskurve aller gleichzeitig entstandenen Elementarwellen bildet eine Wellenfront.

29.5. Die Erklärung von Reflexion und Brechung mit dem Huygensschen Prinzip

Wenn eine Welle auf ein Hindernis auftrifft, so wird sie reflektiert. Dabei ändert sich ihre Ausbreitungsrichtung (vgl. Abb. 29.5.). Die Wellennormale der einfallenden Welle liegt in der gleichen Ebene wie das Einfallslot und die Wellennormale der reflektierten Welle, und es gilt: $\alpha = \alpha'$

Die Gleichheit von Einfalls- und Reflexionswinkel kann man mit dem *Huygens*schen Prinzip erklären.

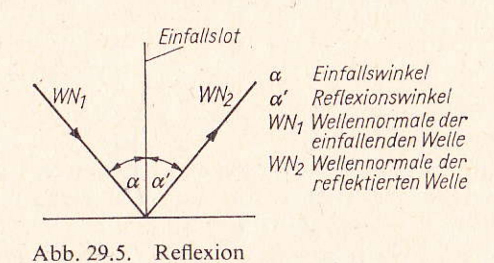


Abb. 29.5. Reflexion

Eine Wellenfront W hat den Punkt A des Hindernisses erreicht (vgl. Abb. 29.6.). Von diesem Punkt geht eine Elementarwelle aus, die nach der Zeit t den Radius $\overline{AC} = c \cdot t$ hat. In der gleichen Zeit ist aber die Wellenfront W bis zum Punkt B gelangt, und es gilt $\overline{AC} = \overline{DB}$. Deshalb sind die Dreiecke ABD und ABC in

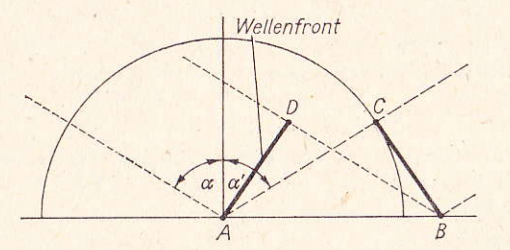


Abb. 29.6. Reflexion und *Huygens*sches Prinzip

Abb. 29.6. kongruent. (Sie sind rechtwinklig und haben die gleiche Hypotenuse.) Daraus folgt die Gleichheit der Winkel DAB und ABC und daraus die Gleichheit von α und β.

Unter Brechung einer Welle versteht man die Änderung der Ausbreitungsrichtung beim Übergang der Welle von einem Medium in ein anderes Medium, in dem die Welle auch eine andere Ausbreitungsgeschwindigkeit hat als vorher (vgl. Abb. 29.7.). Man sagt: Die Welle wird gebrochen. Auch hier liegt die Normale der ge-

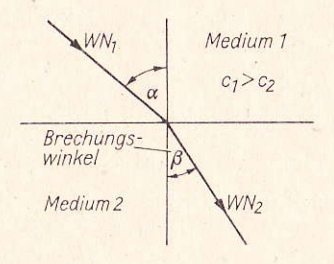


Abb. 29.7. Brechung

brochenen Welle (WN_2) in der gleichen Ebene wie die Normale der einfallenden Welle (WN_1) und das Einfallslot. Es gilt das Brechungsgesetz:

Brechungsgesetz	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{1,2}$

c_1 und c_2 sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Medien 1 und 2, und $n_{1,2}$ heißt die Brechungszahl des ersten Mediums gegen das zweite Medium.

Die Herleitung des Brechungsgesetzes mit Hilfe des *Huygens*schen Prinzips erfolgt ähnlich wie bei der Reflexion, nur muß man den Radius der Elementarwelle entsprechend der veränderten Geschwindigkeit der Welle im neuen Medium wählen.

29.6. Die Interferenz zweier Wellen

Wenn in einem Medium mehrere Wellen erzeugt werden und sich ausbreiten, so müssen die Teilchen des Mediums gleichzeitig mehrere Bewegungen ausführen. Man sagt, daß die Wellen einander überlagern, daß sie interferieren. Interferenzen sind ein wichtiger Nachweis für den Wellencharakter einer Erscheinung.
Wir untersuchen jetzt die Interferenz zweier ebener harmonischer Wellen mit gleicher Amplitude und Wellenlänge, die mit einer bestimmten Phasendifferenz Δs in der gleichen Richtung laufen.
Wir betrachten zwei Fälle:
Im ersten Fall (vgl. Abb. 29.8. oben) erhalten wir eine maximale Verstärkung. Im zweiten Fall (vgl. Abb. 29.8. unten) erhalten wir eine Auslöschung der Wellen. Natürlich kann die Phasendifferenz jeden Wert annehmen. Unsere Beispiele beschreiben die beiden extremen Fälle.

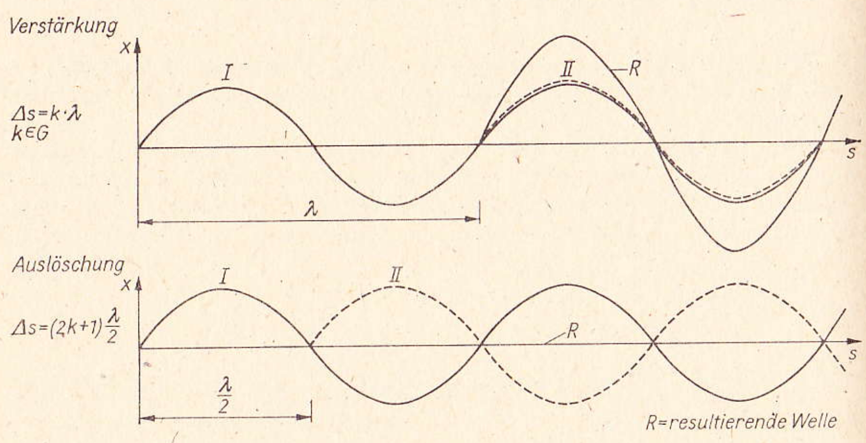


Abb. 29.8. Verstärkung und Auslöschung bei Interferenz

Wortliste zum Text

die Abbildung, -en
an/regen A zu D
aufeinander
aus/breiten, sich
die Ausbreitungsgeschwindigkeit, -en
aus/senden A
bedeuten A
brechen A
brach, gebrochen
das Brechungsgesetz
die Brechungszahl, -en
dagegen
ein/fallen
fiel ein, eingefallen (sein)
das Einfallslot, -e
der Einfallswinkel, -
die Elementarwelle, -n
das Erregungszentrum, Erregungszentren
extrem

der Faden, ¨-
gelangen zu D (sein)
genügen
gerade
Huygens, Christian
die Hypotenuse, -n
die Interferenz, -en
die Longitudinalwelle, -n
das Medium, Medien
nacheinander
der Nachweis, -e
die Phasendifferenz, -en
phasengleich
das Prinzip, -ien
räumlich
rechtwinklig
reflektieren A
die Reflexion, -en
der Reflexionswinkel, -
die Schallwelle, -n
die Schwingungsphase, -n
die Schwingungsrichtung, -en
der Schwingungszustand, ¨-e
die Seilwelle, -n
die Transversalwelle, -n
die Verstärkung
vor/liegen
lag vor, vorgelegen
die Welle, -n
der Wellencharakter
die Wellenfront, -en
die Wellenlänge, -n
die Wellenlehre
die Wellennormale, -n
der Zeitpunkt, -e

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einer mechanischen Welle?
2) Unter welchen Bedingungen entsteht eine mechanische Welle?
3) Was versteht man unter der Wellenlänge λ, und welcher Zusammenhang besteht zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ?
4) Wie ist eine harmonische Welle definiert?
5) Mit welchem mathematischen Modell kann man harmonische Wellen beschreiben?
6) Wodurch unterscheiden sich Transversalwellen und Longitudinalwellen?
7) Was versteht man unter einer Elementarwelle?
8) Was versteht man unter dem *Huygens*schen Prinzip?
9) Unter welchen Bedingungen findet Reflexion statt, und welches Gesetz gilt für diesen Vorgang?
10) Unter welchen Bedingungen gilt das Brechungsgesetz, und was versteht man unter der Brechungszahl?
11) Unter welcher Bedingung findet bei Interferenz zweier Wellen Verstärkung bzw. Auslöschung statt?

2. Übungen zum Text

2.1. Mechanische Wellen und ihre Kenngrößen

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Bei einer mechanischen .... wird Energie durch die .... schwingungsfähiger Teilchen übertragen. Die .... c und die .... sind spezifische Kenngrößen einer Welle. Die .... ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle im .... ausbreitet. Eine Welle ist ...., wenn ihre Teilchen harmonisch schwingen.

harmonisch
Kopplung
Ausbreitungsgeschwindigkeit
Welle
Wellenlänge
Medium

2.1.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

Angabe einer Bedingung

Verwenden Sie Konditionalsätze!

Unter welcher Bedingung
(1) breitet sich eine Schwingung in einem System von schwingungsfähigen Teilchen aus?
(2) sind zwei Teilchen phasengleich?
(3) wird von Teilchen zu Teilchen Energie übertragen?
(4) ist eine Welle eine harmonische Welle?
(5) ist eine Welle eine Transversalwelle?

2.2. Entstehung einer Welle

koppeln A; an/regen A; sich aus/breiten in A

2.2.1. *Ergänzen und beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Wie kann man zwei Pendel ....?
(2) Was kann bei .... Pendeln übertragen werden?

koppeln

(3) Unter welcher Voraussetzung wird in Abb. 29.1. das Pendel B vom Pendel A zum Schwingen ....?
(4) Was geschieht, wenn ein schwingungsfähiges Teilchen .... wird?

an/regen

(5) In welche Richtung .... eine Welle .....?
(6) Wie .... eine Wasserwelle ....?

sich aus/breiten

2.2.2. *Sprechen Sie* über die Entstehung einer mechanischen Welle!

2.3. Wellenarten

Unterscheiden Sie Wellenarten nach
(1) Transversal- und Longitudinalwellen
(2) harmonischen und nichtharmonischen Wellen!

Nennen Sie jeweils ein Beispiel!

2.4. Das Huygenssche Prinzip

2.4.1. *Beantworten Sie folgende Fragen in ganzen Sätzen!*

(1) Unter welcher Bedingung wird ein Punkt eines Mediums zum Erregungszentrum einer Welle?
(2) Welche Wellen bezeichnet man als Elementarwellen?
(3) Wie entsteht eine Wellenfront?
(4) Was gilt für alle Teilchen einer Wellenfront?
(5) In welcher Richtung wird Energie übertragen?
(6) Wie lautet das *Huygens*sche Prinzip?

2.4.2. *Sprechen Sie* zum Thema „Das *Huygens*sche Prinzip“! Verwenden Sie dabei die Übung 2.4.1.!

2.5. Eigenschaften der mechanischen Wellen

2.5.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Wenn die .... auf ein Hindernis trifft, so wird sie .... Bei der Reflexion von Wellen sind der Einfallswinkel und der .... gleich. Unter .... einer Welle versteht man die Änderung der .... beim Übergang der Welle von einem Medium in ein anderes. Die Welle wird .... Bei der Überlagerung von Wellen kann .... und .... der Welle auftreten. Diese Erscheinung bezeichnet man als ....

Ausbreitungsrichtung
Brechung
brechen
Reflexionswinkel
reflektieren
Auslöschung
Interferenz
Verstärkung
Welle

2.5.2. Reflexion

Sprechen Sie über die Reflexion von Wellen, indem Sie folgende Fragen beantworten!

(1) Was bedeutet Reflexion?
(2) Unter welcher Bedingung findet Reflexion statt?
(3) Welches Gesetz gilt für die Reflexion?
(4) Mit welchem Prinzip kann man die Reflexion erklären?

2.5.3. Brechung

Sprechen Sie über die Brechung von Wellen!
Verwenden Sie dabei entsprechende Fragen wie in 2.5.2.!

2.5.4. *Sprechen Sie* über die Interferenz von Wellen!

2.6. Begriffe der Welle

zusammengesetzte Substantive

2.6.1. *Erläutern Sie folgende Begriffe!*
Welle als Bestimmungswort: Wellenlänge, Wellenfront, Wellennormale, Wellengleichung, Welleneigenschaft, Wellenlehre
Welle als Grundwort: Elementarwelle, Transversalwelle, Longitudinalwelle, Oberflächenwelle, Schallwelle

2.6.2. *Ordnen Sie* die folgenden Begriffe nach
(1) Zuständen, (2) Vorgängen, (3) Größen!
Welle, Frequenz, Reflexion, Kreisfrequenz, Elongation, Schwingung, Wellenlänge, Brechung, Resonanz, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Transversalwelle

2.7. Mathematische Beschreibung von Wellen

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $c = \lambda \cdot f$

(2) $x = x_M \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{s}{c}\right)\right]$

(3) $\alpha = \alpha'$

(4) $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{1,2}$

3. Übungen zum Thema

3.1. Experimente zu mechanischen Wellen

3.1.1. *Sprechen Sie* über eine Möglichkeit zur experimentellen Bestimmung der Wellenlänge des Schalls in Luft!

3.1.2. *Erklären Sie* ein Experiment zur Interferenz!

4. Textaufgaben

179. Welche Frequenz haben Wasserwellen, deren Wellenlänge 1,7 cm beträgt, wenn sie sich mit einer Geschwindigkeit von 23 cm/s ausbreiten?

180. Welche Wellenlänge strahlt ein Rundfunksender aus, dessen Frequenz 650 kHz beträgt ($c = 3 \cdot 10^5$ km s^{-1})?

181. Welche Frequenz hat eine Welle, die 12 Sekunden braucht, um 7,5 Wellenlängen zurückzulegen?

182. Wie groß ist die Frequenz einer Welle, die eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 5 m/s und eine Wellenlänge von 1,5 m hat?

183. Wieviel Wellenlängen legt eine Welle in 25 s zurück, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit 40 cm/s und die Wellenlänge 10 cm betragen?

184. Eine Welle hat die Amplitude $x_M = 10$ cm, die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = 60$ cm/s und die Wellenlänge $\lambda = 6$ cm. An welchem Ort s beträgt die Elongation x nach $t = 5$ s Laufzeit 5 cm? ($x(0) = 0$)

185. Wie groß ist der Brechungswinkel β bei einem Einfallswinkel von 42°, wenn die Geschwindigkeit der Welle im neuen Medium 50% der Geschwindigkeit im alten Medium beträgt?

186. Für welchen Einfallswinkel α ist der Brechungswinkel β gleich 90°, wenn folgende Proportion besteht:
$c_1 : c_2 = 1 : 1,3$?

30. Elektromagnetische Schwingungen

30.1. Vorgänge im elektrischen Schwingkreis

Jedes schwingungsfähige System enthält Bauelemente, die Energie speichern können. Aus der Elektrik ist bekannt, daß ein Kondensator elektrische Energie in Form der Energie des elektrischen Feldes speichern kann. Eine Spule kann elektrische Energie in Form der Energie des magnetischen Feldes speichern.
Man betrachtet nun einen Stromkreis, der aus einem Kondensator, Verbindungsleitern und einer Induktionsspule besteht (vgl. Abb. 30.1.). Führt man z. B. dem Kondensator einmalig elektrische Energie zu, so treten zeitlich periodische Änderungen der Spannung, der Stromstärke und der Feldstärken auf.

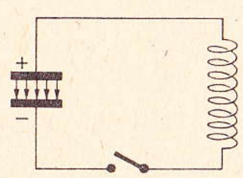


Abb. 30.1. Elektrischer Schwingkreis

In diesem Stromkreis entstehen elektromagnetische Schwingungen. Deshalb bezeichnet man ihn als elektrischen Schwingkreis.
Zu Beginn der elektromagnetischen Schwingung ist im Kondensator elektrische Feldenergie gespeichert. Wird der Schalter geschlossen, so entlädt sich der Kondensator, d. h., es fließt ein Entladestrom. Dabei wird elektrische Feldenergie in magnetische Feldenergie der Spule umgewandelt. Die nun im magnetischen Feld der Spule gespeicherte Energie wandelt sich wieder in elektrische Feldenergie des sich neu aufladenden Kondensators um.
Diesem Vorgang liegen folgende Gesetzmäßigkeiten zugrunde: Jede Änderung der Stromstärke verursacht in der Induktionsspule eine Selbstinduktionsspannung, die nach dem *Lenz*schen Gesetz der Änderung der Stromstärke entgegenwirkt. Wenn also der Kondensator fast entladen ist, und die Stromstärke des Entladestromes wieder abnimmt, so wird diese Abnahme durch die Selbstinduktionsspannung verzögert. Das bedeutet, daß der Strom weiter fließt, obwohl der Kondensator schon entladen ist. Deshalb wird der Kondensator mit umgekehrter Polarität wieder aufgeladen. Damit ist eine halbe Periode eines Vorgangs beschrieben, der sich ständig wiederholt. Dieser Prozeß wird als elektromagnetische Schwingung bezeichnet.

► Eine elektromagnetische Schwingung ist ein Vorgang, bei dem sich physikalische Größen (Spannung, Stromstärke, Feldstärken) zeitlich periodisch ändern.

Wegen des ohmschen Widerstandes wird ein Teil der Feldenergie in Wärme umgewandelt, so daß die Schwingung in der Praxis stets gedämpft ist. Der elektrische Schwingkreis ist ein schwingungsfähiges System und somit ein elektrisches Analogon zu einem mechanischen Schwinger. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich zwischen der elektromagnetischen Schwingung und einer Pendelschwingung.

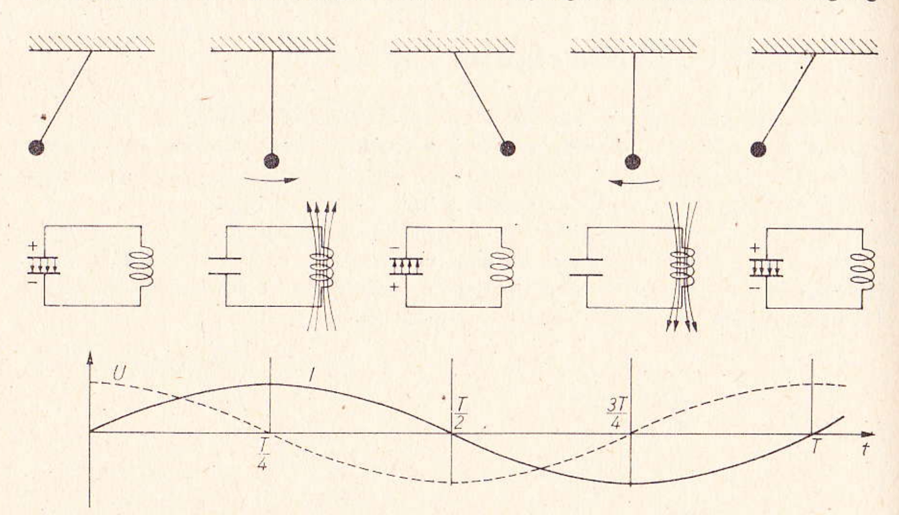


Abb. 30.2. Vergleich von elektromagnetischer und mechanischer Schwingung, Spannung und Stromstärke am Schwingkreis als Funktion der Zeit

Während bei der Pendelschwingung potentielle und kinetische Energie periodisch ineinander umgewandelt werden, wandeln sich bei der elektromagnetischen Schwingung die elektrische Feldenergie und die magnetische Feldenergie periodisch ineinander um.
Aus der Schwingungsgleichung für die elektromagnetische Schwingung (vgl. Übung 3.2.1.) ergibt sich für die Periode der Schwingung die *Thomson*sche Formel:

Schwingungsdauer eines Schwingkreises	$T = 2\pi\sqrt{LC}$

Die Eigenfrequenz und damit die Schwingungsdauer T hängen von der Induktivität L der Spule und der Kapazität C des Kondensators ab.

30.2. Die Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen

Die technische Praxis benötigt ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Energien für viele Zwecke, beispielsweise für die Nachrichtentechnik. In Analogie zur ungedämpften mechanischen Schwingung muß zur Erzeugung einer ungedämpften elektromagnetischen Schwingung einem Schwingkreis periodisch elektrische Energie zugeführt werden. Eine Möglichkeit der periodischen Energiezufuhr ist durch die *Meißner*sche Rückkopplungsschaltung gegeben. Die Energie wird einer Gleichstromquelle entnommen, und mit Hilfe der Triode wird diese Energie dem Schwingkreis periodisch zugeführt. Dazu kann man eine Schaltung nach Abb. 30.3. verwenden. Die Schaltung ist charakterisiert durch die Gitterspule (1), die induktiv mit der Schwingkreisspule (2) gekoppelt ist. Dadurch wird der Anodenstrom der Triode (3) durch den Strom im Schwingkreis gesteuert. Mit dem Lautsprecher (4) kann man bei geeigneter Größe von L und C (vgl. 30.1.) die ungedämpfte elektromagnetische Schwingung nachweisen.

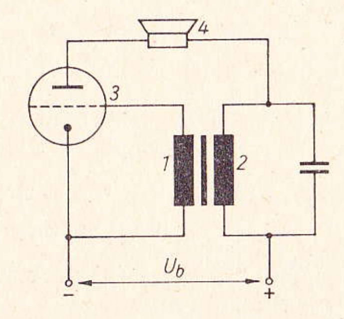


Abb. 30.3. *Meißner*sche Rückkopplungsschaltung

Wortliste zum Text

die Analogie, –n
das Analogon, Analoga
der Anodenstrom, ⸚e
die Arbeitsweise, –n
der Belag, ⸚e
entnehmen A
entnahm, entnommen
folgendermaßen
das Gitter, –
der Höchstwert, –e
der Lautsprecher, –
die Nachrichtentechnik, o.
die Röhre, –n
die Rückkopplungsschaltung, –en
der Schwingkreis, –e
steuern A
die Stromwärme
die Triode, –n
wachsen
wuchs, gewachsen (sein)
zusammen/brechen
brach zusammen, zusammengebrochen (sein)
zusätzlich

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einer elektromagnetischen Schwingung?
2) Wo entstehen elektromagnetische Schwingungen?
3) Welche physikalischen Größen beschreiben die elektromagnetische Schwingung?
4) Wovon hängt die Schwingungsdauer einer elektromagnetischen Schwingung ab?
5) Was ist die Ursache für die Dämpfung der Schwingungen?
6) Wozu verwendet man die *Meißner*sche Rückkopplungsschaltung?
7) Welche Aufgaben hat in der *Meißner*schen Rückkopplungsschaltung die Triode?

2. Übungen zum Text

2.1. Der elektrische Schwingkreis

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Ein .... ist ein Stromkreis zum Erzeugen .... Schwingungen. Ein Schwingkreis besteht aus einer .... und einem ...., die beide miteinander verbunden sind. Wenn sich die .... am Kondensator verringert, entsteht an der Spule ein .... Wenn das magnetische Feld ...., ..., vergrößert sich die .... am Kondensator. Der elektrische Schwingkreis ist das elektrische Analogon zum .... Schwinger.

elektromagnetisch
elektrische Feldstärke
magnetisches Feld
Kondensator
mechanisch
Schwingkreis
zusammenbrechen
Spule

2.1.2. *Beantworten Sie folgende Fragen!*

(1) Woraus besteht ein elektrischer Schwingkreis?
(2) Was für Schwingungen werden im Schwingkreis erzeugt?
(3) Welche Energieumwandlungen treten im Schwingkreis auf?
(4) Was ist die Ursache der Dämpfung der Schwingungen?
(5) Wovon hängt die Schwingungsdauer der elektromagnetischen Schwingungen ab?
(6) Wie kann man ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen erzeugen?

2.1.3. *Sprechen Sie* über die Vorgänge im elektrischen Schwingkreis! Beachten Sie dabei auch Übung 2.1.2.!

2.1.4. *Definieren Sie* die Begriffe, und geben Sie je ein Beispiel!

Substantiv + Partizip,
Substantiv + Adjektiv

Was bedeuten die Begriffe?
kapazitätsabhängige Größe; induktivitätsabhängige Größe; zeitabhängige Größe; frequenzbestimmende Größe; schwingungsfähiges System; induktionsfreies Bauelement; schwingungserzeugendes System

2.2. Schwingungsvorgänge

Angabe eines Grundes

Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen! Verwenden Sie Kausalsätze!

(1) Jede Schwingung ist durch eine Sinus- oder Kosinusfunktion darstellbar.
(2) Bei allen freien Schwingungen nimmt die Amplitude ab.
(3) Jede beliebige Energiezufuhr erzeugt bei einem schwingungsfähigen System ungedämpfte Schwingungen.
(4) Schwingungsvorgänge sind stets mit Energieumwandlungen verbunden.

2.3. Schwingkreis und mechanischer Schwinger

Vergleichen Sie den Schwingkreis mit mechanischen Schwingern, indem Sie die Tabelle 30.1. vervollständigen!

Tabelle 30.1.

schwingungsfähiges System	Energiespeicher	Energieform	math. Formel für die Energie
Federschwinger	bewegte Masse	kinetische Energie	
	gespannte Feder		
Pendelschwinger			
	gehobene Masse		
Schwingkreis			
			$W_{mag} = \frac{1}{2} LI^2$

2.3.2. Vergleichen Sie den mechanischen Schwinger und den Schwingkreis bezüglich der Energieumwandlungen und deren Ursache (vgl. Abb. 30.2.)!

2.4. Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen

2.4.1. *Ergänzen Sie den Text!*

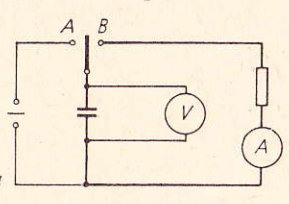
Zur Erzeugung einer .... elektromagnetischen Schwingung muß man einem Schwingkreis .... elektrische Energie .... Mit der *Meißner*schen .... kann man eine solche periodische .... erreichen. Mit Hilfe einer .... wird dem .... Energie aus einer Gleichstromquelle periodisch zugeführt.

Triode
Rückkopplungsschaltung
ungedämpft
periodisch
zuführen
Energiezufuhr
Schwingkreis

3. Übungen zum Thema

3.1. Schaltskizzen und Diagramme

3.1.1. *Vergleichen Sie* die beiden Stromkreise in Abb. 30.4. bezüglich der Bauelemente und der Vorgänge bei Schalterstellung *A* bzw. *B*!



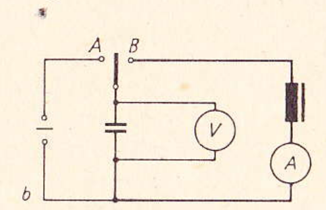
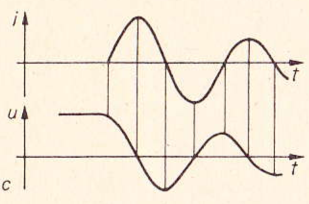


Abb. 30.4.

3.1.2. *Ordnen Sie* den Stromkreisen von Abb. 30.4. die Diagramme von Abb. 30.5. *zu*, und begründen Sie die Zuordnung!



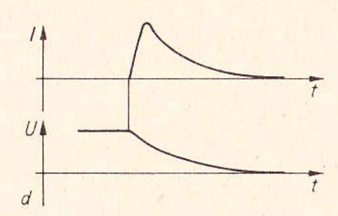
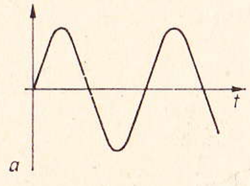
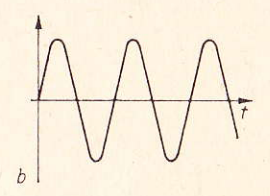


Abb. 30.5.

3.1.3. *Vergleichen Sie* drei Darstellungen von Schwingungen in Abb. 30.6., die in drei verschiedenen Schwingkreisen erzeugt wurden!
Was können Sie über die Bauelemente der Schwingkreise aussagen?





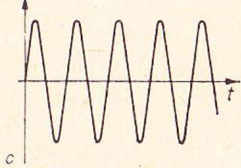


Abb. 30.6.

3.2. Schwingungsdauer eines Schwingkreises

3.2.1. *Leiten Sie* die Gleichung für die Schwingungsdauer *T* eines Schwingkreises aus dem Energieerhaltungssatz *her*, indem Sie die Fragen beantworten bzw. die Teilaufgaben lösen!

Hinweis: Man beachte, daß $I = I(t)$ und $Q = Q(t)$ gilt. Außerdem soll der Schwingkreis keinen ohmschen Widerstand enthalten.

(1) Nach welcher Gleichung berechnet man die augenblickliche Energie am Kondensator?
(2) Nach welcher Gleichung berechnet man die augenblickliche Energie an der Spule?
(3) Wie lautet dann der Energiesatz, wenn man die Energieverluste durch den Leiter vernachlässigt?
(4) Welche Gleichung erhält man, wenn man für U den Ausdruck Q/C einsetzt und dann die Gleichung nach t differenziert?
(5) Welche Gleichung erhält man, wenn man für $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$ den Ausdruck I einsetzt und weiter vereinfacht?
(6) Welche Gleichung erhält man, wenn man noch einmal nach t differenziert und weiter vereinfacht?
Dabei gilt $\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = I$.
(7) Schreiben Sie die Ableitung der Variablen mit I! Vergleichen Sie die erhaltene Gleichung mit $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$, und berechnen Sie die Schwingungsdauer, indem Sie die Koeffizienten von I und x gleichsetzen!

3.2.2. *Interpretieren Sie* die Gleichung für die Schwingungsdauer!

3.3. Analogie von Gleichungen

Sprechen Sie über die Analogie der entsprechenden Gleichungen!

Federschwinger	Schwingkreis
$F = m \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$	$U = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$
$F = k \cdot \Delta x$	$U = \frac{1}{C}Q$
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$

Welche Größen entsprechen einander?

3.4. Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung

3.4.1. *Beantworten Sie* die folgenden Fragen!

(1) Woraus besteht die *Meißner*sche Rückkopplungsschaltung?
(2) Wie sind Gitterspule und Schwingkreisspule gekoppelt?
(3) Welche Gesetze gelten für diese Kopplung?

(4) Unter welcher Bedingung ist das Gitter positiv geladen?
(5) Unter welcher Bedingung erfolgt eine Schwächung des Anodenstromes?
(6) Warum erhält man bei dieser Schaltung ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen?

3.4.2. *Sprechen Sie* über die Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen! Beachten Sie dabei Übung 3.4.1.!

4. Textaufgaben

187. Berechnen Sie die Schwingungsdauer einer elektromagnetischen Schwingung in einem Schwingkreis mit der Induktivität 0,6 H und der Kapazität 6,5 μF!

188. Wie groß ist die Induktivität eines Schwingkreises, wenn eine Schwingungsdauer von 1 s bei einer Kapazität von 30 μF gemessen wird?

189. Welche Frequenz besitzt ein Schwingkreis, der aus einem Kondensator von 500 pF und einer Spule von 45 μH besteht?

190. Für einen elektrischen Schwingkreis steht eine Spule mit einer Induktivität von 500 mH zur Verfügung. Wie groß muß man die Kapazität des Kondensators wählen, wenn eine Frequenz von 10^3 Hz erreicht werden soll?

191. Die Spule eines Schwingkreises hat eine Länge von 25 cm, einen Durchmesser von 3 cm, und ihre Windungszahl beträgt 1 500. Der Kondensator des Schwingkreises hat eine Kapazität von 45 μF. Wie groß ist die Periode der entstehenden elektromagnetischen Schwingung?

31. Elektromagnetische Wellen und elektromagnetisches Spektrum

31.1. Entstehung einer elektromagnetischen Welle am elektrischen Schwingkreis

Am elektrischen Schwingkreis sind elektrisches und magnetisches Feld weitgehend lokalisiert, sie existieren im wesentlichen im Kondensator und in der Spule und ändern sich zeitlich periodisch. Deshalb liegt eine Schwingung vor. Vergrößert man den Abstand zwischen den Kondensatorplatten erheblich, so gewinnt das elektrische Feld stark an Ausdehnung.
Es breitet sich als elektrisches Wechselfeld mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus. Damit verbunden ist ein magnetisches Wechselfeld. Der Schwingkreis wird nun als offener Schwingkreis bezeichnet (vgl. Abb. 31.1.). Er wirkt als Erregungszen-

trum für einen zeitlich und räumlich periodischen Vorgang, für eine elektromagnetische Welle. Auch ein gerader Metallstab besitzt noch alle Eigenschaften eines offenen Schwingkreises. Er wird als Dipol bezeichnet. Die Kapazität und die Induktivität des Dipols sind von seiner Länge abhängig. Durch die Bewegung der elektrischen Ladungen auf dem Dipol werden im Wechsel elektrische und magnetische Felder erzeugt.

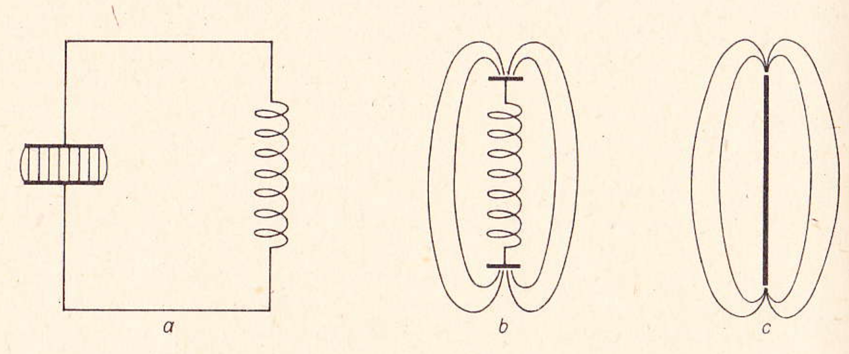


Abb. 31.1. Geschlossener (a) und offener (b) Schwingkreis; Dipol (c)

Diese Felder breiten sich vom Dipol in den Raum aus, und damit wird der Dipol ebenfalls zum Erregungszentrum einer elektromagnetischen Welle.

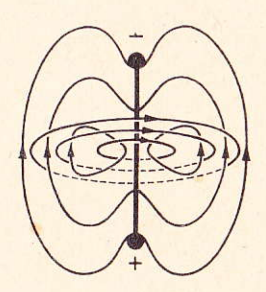


Abb. 31.2. Dipol als Erregungszentrum einer elektromagnetischen Welle

Aus der Abbildung 31.2. werden folgende Eigenschaften der elektromagnetischen Welle deutlich:

1. Sie besteht aus zwei Komponenten, einem elektrischen und einem magnetischen Wechselfeld. Diese Wechselfelder stehen miteinander in Wechselwirkung.

2. Der Vektor der elektrischen Feldstärke steht senkrecht auf dem Vektor der magnetischen Feldstärke.

3. Beide Komponenten stehen senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung, so daß die elektromagnetische Welle eine Transversalwelle ist (vgl. Abb. 31.3.).

Die Theorie der elektromagnetischen Wellen wurde von *J. C. Maxwell* in den Jahren 1861 bis 1864 umfassend erarbeitet.

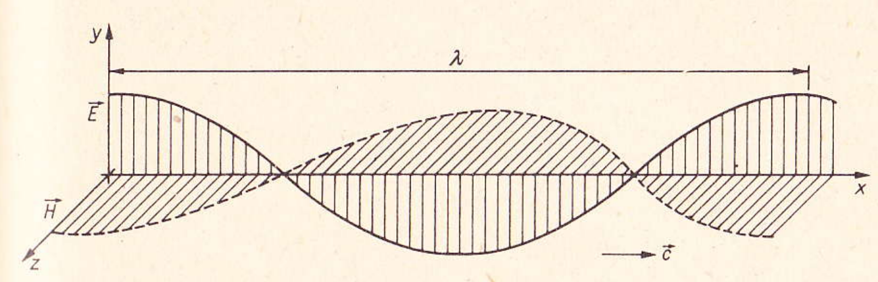


Abb. 31.3. Schwingungsebenen des elektrischen und magnetischen Feldvektors bei einer ebenen elektromagnetischen Welle

31.2. Das elektromagnetische Spektrum

Außer elektromagnetischen Schwingungen am offenen Schwingkreis (Dipol) führen auch andere Vorgänge zur Entstehung von elektromagnetischen Wellen der verschiedensten Frequenzen. Es sind dies Bahnübergänge von Elektronen in der Atomhülle, Veränderungen im Atomkern, Funken, Induktionsvorgänge usw. Die Gesamtheit der elektromagnetischen Wellen wird im elektromagnetischen Spektrum nach Wellenlängen geordnet dargestellt.
Alle Wellen zeigen neben den bereits genannten Eigenschaften noch Reflexion, Brechung und Interferenz, wobei jedoch Besonderheiten in Abhängigkeit von der Wellenlänge beachtet werden müssen.

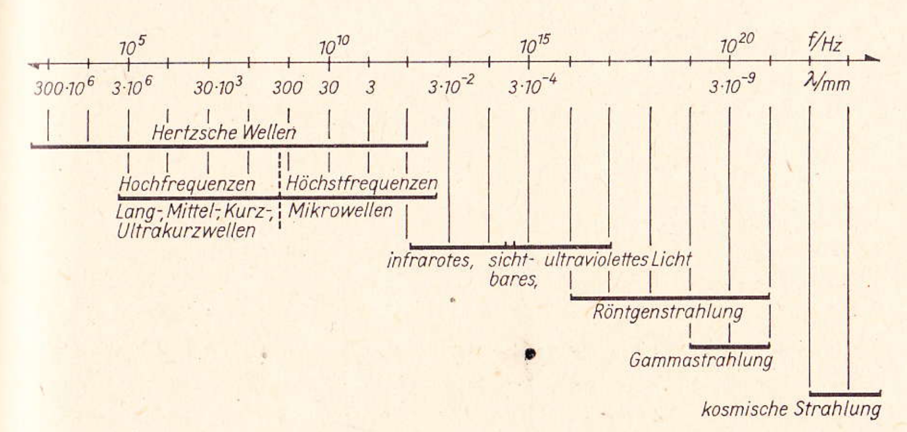


Abb. 31.4. Das elektromagnetische Spektrum für das Vakuum

31.3. Hertzsche Wellen

*Hertz*sche Wellen sind elektromagnetische Wellen mit einem Wellenlängenbereich von 10^{13} nm bis 10^{6} nm. Sie werden mit Hilfe eines offenen Schwingkreises erzeugt und sind die Grundlage der Nachrichtentechnik.

Wellenbereich	Wellenlänge in nm	Verwendung
Langwellen	10^{13} bis 10^{12}	Telegrafie
Mittelwellen	10^{12} bis 10^{11}	Telefonie
Kurzwellen	10^{11} bis 10^{10}	Radiorundfunk
Ultrakurzwellen	10^{10} bis 10^{9}	Fernsehfunk
Dezimeterwellen	10^{9} bis 10^{8}	Radartechnik
Mikrowellen	10^{8} bis 10^{6}	

Langwellen, Kurzwellen und Ultrakurzwellen sind durch ihre Ausbreitung in der Nähe der Erdoberfläche deutlich unterschieden.

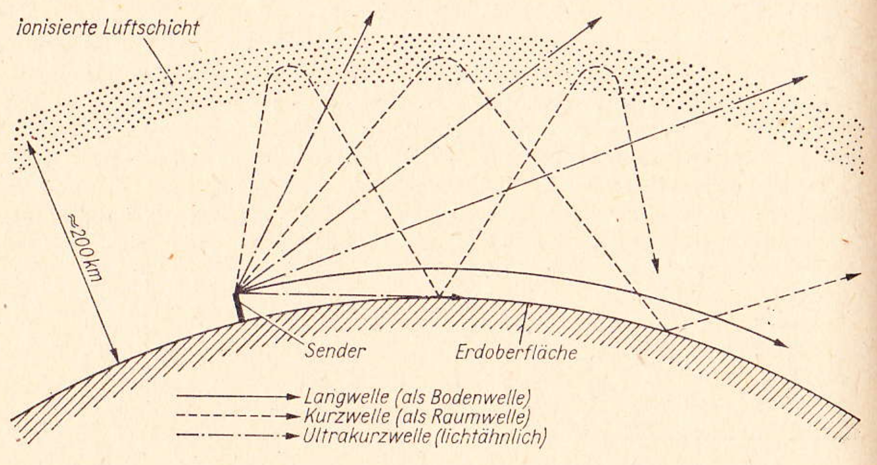


Abb. 31.5. Ausbreitung *Hertz*scher Wellen

Die technischen Mittel, die für die Verwendung der verschiedenen Wellen notwendig sind, werden durch diese unterschiedliche Ausbreitung bestimmt.

31.4. Die wissenschaftlichen Leistungen von Heinrich Hertz

Maxwell hatte aufgrund seiner Theorie die Existenz von elektromagnetischen Wellen vorausgesagt. *Heinrich Hertz* gelang es als erstem, diese elektromagnetischen Wellen experimentell nachzuweisen. Dazu mußte er sehr hochfrequente elektrische Schwingungen erzeugen, was ihm mit Hilfe eines speziell zu diesem Zweck entwickelten Dipols möglich war. Der Dipol strahlte Wellen aus, deren Wellenlänge einige Meter betrug. Mit Kenntnis dieser Wellenlänge und der Frequenz konnte *Heinrich Hertz* die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen berechnen. Sie ergab sich in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit.
Damit war ein Zweifel an der Richtigkeit der *Maxwell*schen Theorie nicht mehr möglich. Durch weitere überzeugende Experimente konnte *Hertz* im Jahre 1888 auch die Reflexion, die Brechung und andere Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen nachweisen. Die bis dahin unabhängigen Gebiete der Elektrizitätslehre und der Optik waren damit vereinigt und ein großer Schritt in Richtung auf eine einheitliche Theorie der physikalischen Erscheinungen getan. Darin liegt die große Bedeutung der *Hertz*schen Experimente. Infolge seines frühen Todes – er starb mit 37 Jahren – konnte *Heinrich Hertz* nicht mehr zur Anwendung seiner großen Entdeckung beitragen.

Wortliste zum Text

die Atomhülle, –n
der Atomkern, –e
aus/strahlen A
der Bahnübergang, ⸗e
bei/tragen zu D
trug bei, beigetragen
die Bodenwelle, –n
die Dezimeterwelle, –n
der Dipol, –e
einheitlich
erarbeiten A
erheblich
der Fernsehfunk, o.
der Funke, –n
gelingen
gelang, gelungen (sein)
die Größenordnung, –en
Hertz, Heinrich
hochfrequent
die Kurzwelle, –n
die Langwelle, –n
die Lichtgeschwindigkeit, –en
lokalisieren A
die Mikrowelle, –n
die Mittelwelle, –n
die Optik, o.
die Radartechnik, o.
der Radiorundfunk, o.
der Sender, –
das Spektrum, Spektren
die Telefonie, o.
die Telegrafie, o.
die Übertragung, –en
die Ultrakurzwelle, –n
umfassend
vereinigen, (sich) A
voraus/sagen A
das Wechselfeld, –er
die Wechselwirkung, –en
weitgehend
der Zweifel, –

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wodurch unterscheidet sich der geschlossene Schwingkreis vom offenen Schwingkreis?
2) Was versteht man unter einer elektromagnetischen Welle?
3) Wozu verwendet man einen Dipol?
4) Aus welchen beiden Komponenten besteht eine elektromagnetische Welle?
5) Welche Relation besteht zwischen dem Vektor der elektrischen Feldstärke und dem der magnetischen Feldstärke?
6) Wonach sind die Wellen im elektromagnetischen Spektrum geordnet?
7) Was sind *Hertz*sche Wellen, und wozu verwendet man sie?
8) Worin besteht die wissenschaftliche Leistung von *Heinrich Hertz*?

2. Übungen zum Text

2.1. Offener Schwingkreis und Entstehung von elektromagnetischen Wellen

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Ein .... wirkt wie ein offener Schwingkreis. Die Induktivität und die .... des Dipols sind von seiner .... abhängig. Durch die .... der elektrischen Ladungen werden am Dipol .... und .... Felder erzeugt, die sich in den Raum .... Der Dipol wird zum .... einer .... Welle.	Kapazität Dipol Bewegung Länge elektrisch ausbreiten magnetisch elektromagnetisch Erregungszentrum

2.1.2. *Sprechen Sie* über die Entstehung einer elektromagnetischen Welle, indem Sie folgende Hinweise benutzen!

(1) Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis
(2) Ursache der Ausbreitung eines Wechselfeldes
(3) Offener Schwingkreis als Erregungszentrum einer elektromagnetischen Welle

2.2. Vergleich von offenem und geschlossenem Schwingkreis

Vergleichen Sie einen offenen und einen geschlossenen Schwingkreis bezüglich

(1) des Aufbaus,
(2) der Ausstrahlung von elektrischer Energie,
(3) der Funktion!

2.3. Eigenschaften elektromagnetischer Wellen

sich aus/breiten (als N), (mit D), (in D)

2.3.1. *Bilden und beantworten Sie die Fragen!*

► Wie (Wo) breiten sich die verschiedenen Wellen aus?
Langwellen breiten sich als Bodenwellen aus.

(1) Langwelle / als Bodenwelle
(2) Kurzwelle / als Raumwelle
(3) Ultrakurzwelle / lichtähnlich
(4) *Hertz*sche Welle / mit Lichtgeschwindigkeit
(5) *Hertz*sche Welle / im Vakuum
(6) *Hertz*sche Welle / in Luft

2.3.2. *Sprechen Sie* über wichtige Eigenschaften elektromagnetischer Wellen!

2.4. Hertzsche Wellen

Angabe eines Zwecks oder eines Mittels

Beantworten Sie die folgenden Fragen!
Beachten Sie das Fragewort!

(1) Wodurch unterscheiden sich die verschiedenen *Hertz*schen Wellen?
(2) Wozu verwendet man die verschiedenen *Hertz*schen Wellen?

2.5. Die Bedeutung der Leistungen von H. Hertz

Beantworten Sie folgende Fragen!

(1) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der *Maxwell*schen Theorie und den *Hertz*schen Experimenten?
(2) Welche Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen konnte *H. Hertz* nachweisen?
(3) Worin besteht die wissenschaftliche Bedeutung der Leistungen von *H. Hertz*?

3. Übungen zum Thema

3.1. Hertzsche Wellen

Sprechen Sie über die Erzeugung und Ausbreitung *Hertz*scher Wellen. Informieren Sie sich dazu auch in einem Physiklehrbuch!

3.2. Arten der Entstehung von elektromagnetischen Wellen

Sprechen Sie über die verschiedenen Möglichkeiten der Entstehung elektromagnetischer Wellen!

3.3. Elektromagnetisches Spektrum

Sprechen Sie über die Anordnung der Wellen im elektromagnetischen Spektrum! Geben Sie Beispiele der Verwendung der verschiedenen elektromagnetischen Wellen in der Technik!

4. Textaufgaben

192. Berechnen Sie die Frequenzen elektromagnetischer Wellen mit den Wellenlängen $\lambda_1 = 5$ km, $\lambda_2 = 20$ cm, $\lambda_3 = 500$ nm und $\lambda_4 = 1$ nm! Bestimmen Sie mit Hilfe des elektromagnetischen Spektrums die Art dieser vier elektromagnetischen Wellen! (Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum beträgt $3 \cdot 10^5$ km/s.)

193. Wie groß sind die Wellenlängen elektromagnetischer Wellen mit den Frequenzen $f_1 = 8 \cdot 10^{20}$ Hz, $f_2 = 5 \cdot 10^{15}$ Hz und $f_3 = 10^6$ Hz? Bestimmen Sie mit dem elektromagnetischen Spektrum die Art der Wellen!

32. Der Wellencharakter des Lichtes

32.1. Das Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums

Licht entsteht infolge bestimmter Zustandsänderungen in den Atomen oder Molekülen der Körper. Es breitet sich in Form von Wellen aus. Als Licht bezeichnet man elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von $\lambda_1 = 4{,}2 \cdot 10^5$ nm bis $\lambda_2 = 13$ nm. Zu diesem Intervall gehören das sichtbare Licht, das ultrarote und das ultraviolette Licht.
Das Licht hat alle bereits genannten Eigenschaften der elektromagnetischen Wel-

len. Die Lichtgeschwindigkeit c ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge λ und der Frequenz f des Lichtes:

Lichtgeschwindigkeit	$c = \lambda \cdot f$

Die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Medium ergibt sich aus der Abhängigkeit der Wellenlänge λ vom Medium. Die Frequenz f ist vom Medium unabhängig.

Tabelle 32.1. Wellenlänge und Geschwindigkeit des Lichtes

Wellenlänge des Lichtes in nm (im Vakuum)		Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien in km s^{-1}	
ultrarotes Licht	$4{,}2 \cdot 10^5$–780	Vakuum	299793
sichtbares Licht	780–360	Luft	299711
		Wasser	225350
ultraviolettes Licht	360–13	Alkohol	220380
		Diamant	121340

In den folgenden Ausführungen werden wichtige Eigenschaften des Lichtes mit Hilfe seines Wellencharakters erklärt.

32.2. Eigenschaften der Lichtwellen

32.2.1. Reflexion und Brechung des Lichtes

Die Gesetze für die Reflexion und die Brechung, wie sie für mechanische Wellen erklärt wurden, können ohne Einschränkung auf Lichtwellen übertragen werden.
Reflexion findet statt, wenn Licht auf ein Hindernis auftrifft. Für diesen Vorgang gilt das Reflexionsgesetz:

Reflexionsgesetz	$\alpha = \alpha'$

▶ Die Normale der einfallenden Welle 1, das Einfallslot l und die Normale der reflektierten Welle 1′ liegen in einer Ebene. Der Einfallswinkel α ist gleich dem Reflexionswinkel α' (vgl. Abb. 32.1.).

Körper, die nicht selbst leuchten, kann man nur sehen, weil sie Licht reflektieren. Die Gesetzmäßigkeiten der Reflexion des Lichtes werden bei ebenen und gewölbten Spiegeln ausgenutzt.

Auch bei der Brechung erfolgt eine Richtungsänderung der Lichtwelle. Sie findet statt, wenn die Lichtwelle von einem Medium in ein anderes übertritt. Für diesen Vorgang gilt das Brechungsgesetz:

Brechungsgesetz	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{1,2}$

▶ Die Normale der einfallenden Welle 1, das Einfallslot *l* und die Normale der gebrochenen Welle 1′ liegen in einer Ebene. Die Sinuswerte des Einfallswinkels α und des Brechungswinkels β verhalten sich wie die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lichtwelle in den beiden Medien (vgl. Abb. 32.1.).

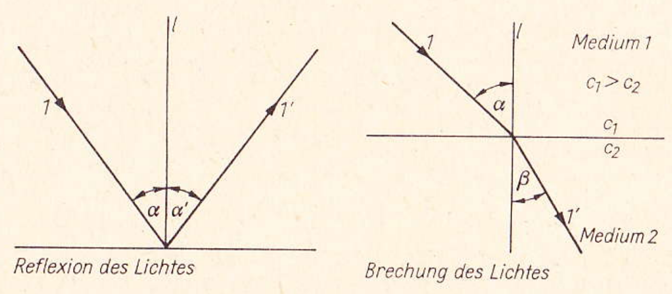


Abb. 32.1. Reflexion und Brechung des Lichtes

$n_{1,2}$ bezeichnet man als Brechungszahl für den Übergang des Lichtes vom Medium 1 in das Medium 2.
Es gilt:

$$n_{1,2} = \frac{1}{n_{2,1}}$$

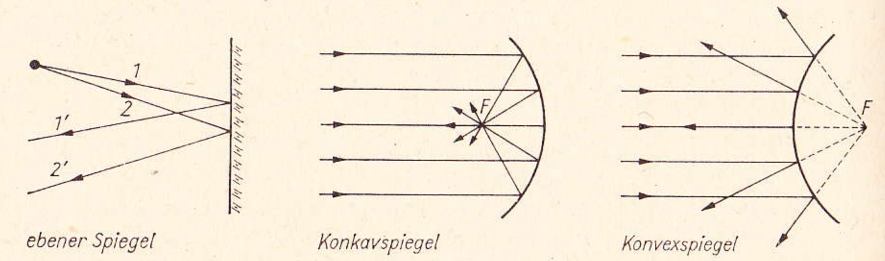


Abb. 32.2. Anwendung der Reflexion

Aus $\alpha > \beta$ folgt $c_1 > c_2$ (vgl. Abb. 32.3.). Man sagt: Wenn die Welle zum Lot hin gebrochen wird, so geht sie vom optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres Medium über.

Aus $\alpha < \beta$ folgt $c_1 < c_2$. Man sagt: Wenn die Welle vom Lot weg gebrochen wird, so geht sie vom optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium über.
Die Brechung hat große Bedeutung für viele optische Geräte, weil die Wirkung von Linsen eine Folge der Brechung ist.

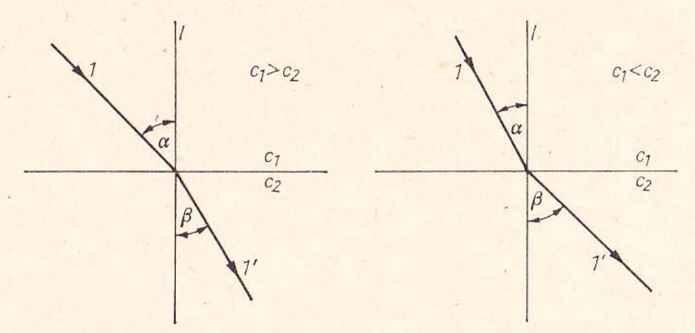


Abb. 32.3. Brechung in verschiedenen Medien

32.2.2. Besonderheiten der Brechung

32.2.2.1. *Die Dispersion des Lichtes*

Das weiße Licht besteht aus verschiedenen Anteilen, die sich durch ihre Frequenz bzw. Wellenlänge unterscheiden. Die Brechungszahl n hängt nicht nur von den Medien, sondern auch von der Wellenlänge λ des Lichtes ab. Sie wird mit abnehmender Wellenlänge größer. So beträgt die Brechungszahl für rotes Licht 1,73 und für violettes Licht 1,81 beim Übergang von Luft in Flintglas. Wegen dieser Gesetzmäßigkeit kann man mit einem Prisma infolge der Brechung das Licht in Anteile verschiedener Wellenlänge zerlegen. Diesen Vorgang nennt man Dispersion.
Das Ergebnis der Dispersion sind Dispersionsspektren. Die Zerlegung des weißen Lichtes (vgl. Abb. 32.4.) ergibt ein kontinuierliches Dispersionsspektrum. Die genaue Untersuchung von Spektren ist Gegenstand der Spektralanalyse.

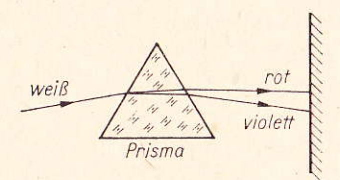


Abb. 32.4. Zur Dispersion

3.2.2 2.2. *Die Totalreflexion*

Tritt Licht von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium (vgl. Abb. 32.3.), so wird es vom Lot weg gebrochen, d. h. der Brechungswinkel β ist wegen $c_2 > c_1$ größer als der Einfallswinkel α. Es gibt einen Einfallswinkel α_G, zu dem ein Brechungswinkel von 90° gehört. Bei allen Strahlen mit Einfallswin-

keln $\alpha > \alpha_G$ erfolgt an den Grenzflächen der Medien eine vollständige Reflexion, d. h., daß die Lichtwellen nicht in das dünnere Medium eintreten können (vgl. Abb. 32.5.).

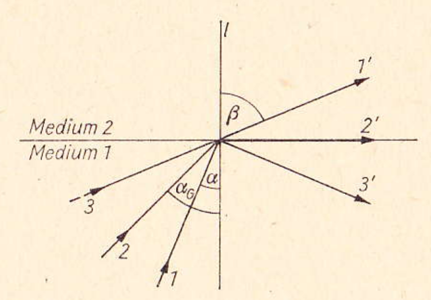


Abb. 32.5. Zur Totalreflexion

■ **Lehrbeispiel:**

Man berechne den Grenzwinkel bei Totalreflexion an einer Grenzfläche zwischen Glas und Luft!

S_1: Glas ist optisch dichter als Luft

S_2: Es gilt das Brechungsgesetz: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{1,2}$

Außerdem gilt für die Brechungszahlen: $n_{1,2} = \frac{1}{n_{2,1}}$

S_3: allgemeines Ergebnis: $\sin \beta = 1$ und $\sin \alpha = \frac{1}{n_{2,1}}$

spezielles Ergebnis für $n_{1,2} = 1{,}52$: $\sin \alpha = \frac{1}{1{,}52}$;

$\alpha = 41{,}1°$

Die Totalreflexion hat große praktische Bedeutung, weil der Energieverlust an totalreflektierenden Flächen geringer ist als an Spiegeln. Zur Richtungsänderung von Lichtstrahlen benutzt man deshalb in optischen Geräten, wie Fernrohren und Fotoapparaten, totalreflektierende Prismen.
In der Faseroptik benutzt man die Totalreflexion dazu, das Licht auf gekrümmtem Wege zu übertragen. Das hat große Bedeutung für die Beleuchtung von Skalen, Spalten und Hohlräumen (z. B. Hohlräume im menschlichen Körper).
Die Erscheinung der Totalreflexion ist ein weiteres Beispiel für die Erkenntnis

des dialektischen Materialismus, daß kontinuierliche Änderungen einer Quantität, das ist in unserem Beispiel die Größe des Einfallswinkels, zum diskontinuierlichen Umschlag in eine neue Qualität (Totalreflexion) führen.

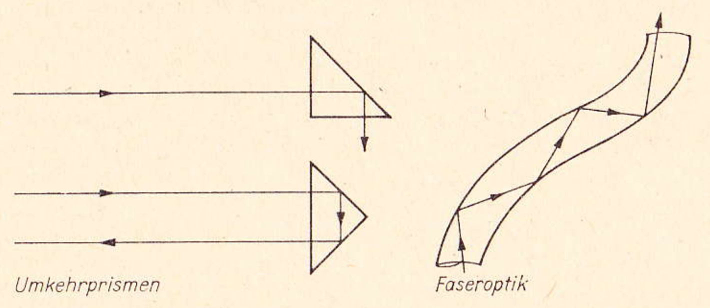


Abb. 32.6. Anwendung der Totalreflexion

32.2.3. Die Beugung des Lichtes

Die Beugung ist eine allgemeine Wellenerscheinung. Sie tritt beispielsweise auf, wenn die Welle durch schmale Öffnungen (Spalte) geht. Dabei ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Welle, denn hinter dem Spalt breitet sich nach dem *Huygens*schen Prinzip eine Elementarwelle in Form einer Kreis- oder Kugelwelle aus. Damit die Beugung feststellbar ist, darf der Spalt nicht wesentlich größer als die Wellenlänge der benutzten Welle sein. Anderenfalls kommt es nach dem Spalt zu Interferenzerscheinungen mehrerer Elementarwellen, so daß das Beugungsbild zerstört wird.

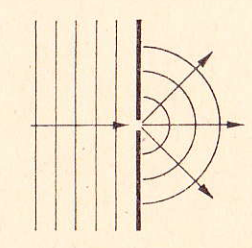


Abb. 32.7. Zur Beugung

32.2.4. Die Interferenz des Lichtes

Interferenzerscheinungen kann man auch beim Licht beobachten. Das ist eine wichtige Bestätigung für den Wellencharakter des Lichtes.
Damit Wellen interferieren können, müssen sie kohärent sein, d. h., ihre Phasendifferenz muß am Ort der Interferenz konstant sein. Beim Licht sind die Verhältnisse besonders kompliziert, weil die Frequenz sehr groß ist und weil die einzelnen Atome einer Lichtquelle unabhängig voneinander viele kleine Wellenzüge aus-

senden. Licht von zwei voneinander unabhängigen Lichtquellen ist deshalb inkohärent. Kohärente Wellen erzeugt man durch Teilung einer gegebenen Lichtwelle in Teilwellen. Das kann durch Beugung oder Reflexion erreicht werden.
Es soll nun die Interferenz durch Beugung am Doppelspalt genauer untersucht werden.
Wenn man kohärentes Licht einer bestimmten Wellenlänge, d. h. kohärentes monochromatisches Licht, durch einen Doppelspalt gehen läßt, so kann man auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt helle Streifen sehen, die symmetrisch zum mittleren Streifen angeordnet sind (vgl. Abb. 32.8.). Diese hellen Streifen ent-

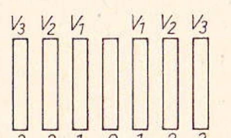


Abb. 32.8. Schema eines Beugungsbildes

sprechen Verstärkungsgebieten, die durch die Interferenz des Lichtes nach Beugung am Doppelspalt entstehen. Man bezeichnet diese Streifen als Verstärkungsgebiete 0., 1., 2., ..., *n*ter Ordnung. Zwischen den Verstärkungsgebieten liegen Gebiete verringerter Lichtintensität.
Mit Hilfe der Abb. 32.9. kann man einen wichtigen Zusammenhang erklären. b ist der Abstand der beiden Spalte. V_1 ist das erste Verstärkungsgebiet rechts vom Mittelstreifen. Für dieses Gebiet ist die Phasendifferenz gleich λ. Aus der Ähnlichkeit der beiden Dreiecke folgt die Proportion $\lambda : b = s_1 : e_1$.
Da s_1 sehr viel kleiner als e ist, gilt $e_1 \approx e$. Damit erhält man die Gleichung

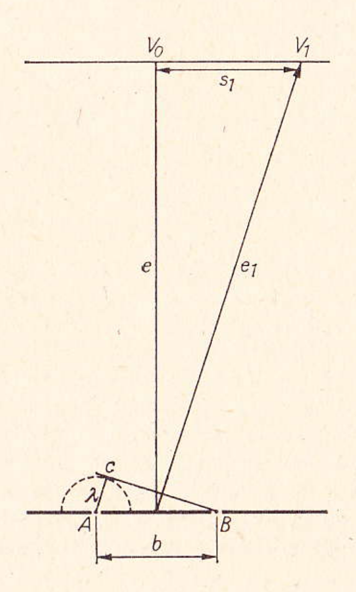


Abb. 32.9. Zur Beugung am Doppelspalt

$\lambda : b = s_1 : e$ für das erste Verstärkungsgebiet. Analog gilt für das *n*te Verstärkungsgebiet:

$$\frac{n\lambda}{b} = \frac{s_n}{e}$$

Da man im allgemeinen den Abstand der beiden Spalte kennt und e und s_n messen kann, ist es möglich, mit Hilfe der Interferenz die Wellenlänge des verwendeten Lichtes experimentell zu bestimmen.
Die Interferenzerscheinungen werden deutlicher, wenn man ein ganzes System von Spalten, ein optisches Gitter, verwendet. Gute Gitter haben 2000 Spalte pro Millimeter. Wenn man nicht einfarbiges, sondern weißes Licht verwendet, erhält man mehrfarbige Beugungsspektren, die paarweise in mehreren Ordnungen auftreten.

32.2.5. Die Polarisation des Lichtes

Als elektromagnetische Welle ist das Licht eine Transversalwelle. Eine Bestätigung für diese Aussage ist die Möglichkeit der Polarisation des Lichtes. Das normale Licht enthält in jeder möglichen Schwingungsrichtung entsprechend schwingende Wellenzüge. Es ist also keine Schwingungsrichtung bevorzugt. Durch geeignete Vorrichtungen, die man Polarisatoren nennt, kann man erreichen, daß das Licht nur noch in einer Richtung schwingt. Man nennt dann das Licht linear polarisiert.

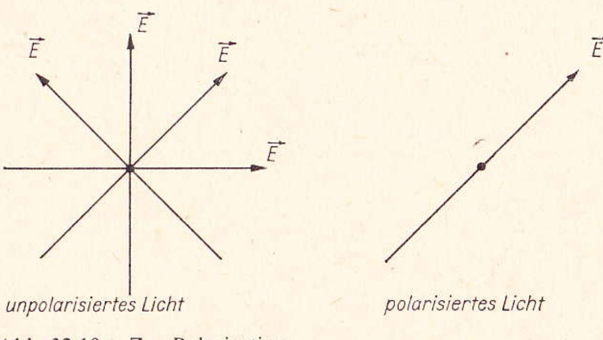


Abb. 32.10. Zur Polarisation

Als Polarisatoren verwendet man Polarisationsfilter, die durch Brechung, Reflexion oder andere Effekte polarisiertes Licht erzeugen.
Wenn man nachweisen will, daß das Licht polarisiert ist, bringt man hinter das erste Polarisationsfilter (Polarisator) ein zweites Polarisationsfilter (Analysator). Wenn man den Analysator so dreht, daß seine Schwingungsebene um 90° gegen die Ebene des Polarisators geneigt ist, so kann das vom Polarisator linear polarisierte Licht den Analysator nicht durchdringen. Wir erhalten hinter dem Analysator Dunkelheit, obwohl beide Filter lichtdurchlässig sind.

Wortliste zum Text

die Ähnlichkeit, -en
der Analysator, -en
die Analyse, -n
die Aufnahme, -n
die Aufspaltung, -en
aus/nutzen A
die Belastung, -en
beugen A
das Beugungsbild, -er
das Beugungsspektrum, Beugungsspektren
der Diamant, -en
diskontinuierlich
die Dispersion, o.
das Dispersionsspektrum, Dispersionsspektren
der Doppelspalt, -e
durchdringen A
durchdrang, durchdrungen
durchlässig
eben
der Effekt, -e
einfarbig
das Element, -e
die Faseroptik
das Fernrohr, -e
das Filter, -
das Flintglas
fotografisch
der Grenzwinkel, -
der Hohlraum, ⸚e
inkohärent
interferieren mit D
kohärent
das Konstruktionsteil, -e
krümmen (sich) A
leuchten
das Lichtbündel, -
die Lichtintensität, -en
die Lichtquelle, -n
der Lichtstrahl, -en
die Lichtwelle, -n
die Lösung, -en
der Materialismus, o.
menschlich
monochromatisch
nebenstehend
neigen A
optisch dichter
optisch dünner
paarweise
die Polarisation, o.
der Polarisator, -en
polarisieren A
das Prisma, Prismen
die Proportion, -en
der Schirm, -e
schmal
die Schwingungsebene, -n
sichtbar
der Spalt, -e
die Spektralanalyse, -n
der Spiegel, -
stören
die Substanz, -en
symmetrisch
die Totalreflexion
ultrarot
ultraviolett
der Umschlag
das Verstärkungsgebiet, -e
sich vor/stellen A
der Wellenzug, ⸚e
wölben (sich) A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche elektromagnetischen Wellen bezeichnet man als Licht?
2) Wovon hängt die Lichtgeschwindigkeit ab?
3) Welche Gesetze gelten für Reflexion und Brechung?
4) Wovon hängt die Brechungszahl ab?
5) Was ist Dispersion?
6) Unter welchen Bedingungen findet Totalreflexion statt?
7) Unter welcher Bedingung tritt beim Licht Beugung auf?
8) Was sind kohärente Wellen, und wie kann man sie erzeugen?
9) Wie entsteht ein Beugungsspektrum?
10) Mit welcher Gleichung kann man bei der Beugung am Doppelspalt die Wellenlänge λ des Lichtes berechnen?
11) Was ist ein optisches Gitter?
12) Welche Eigenschaft des Lichtes bestätigt seine Transversalität?
13) Wie kann man polarisiertes Licht nachweisen?

2. Übungen zum Text

2.1. Eigenschaften des Lichtes

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Die .... n hängt von der Frequenz f ab. Deshalb kann man weißes Licht mit einem .... in verschiedene Farben .... Diesen Vorgang nennt man	Prisma Brechungszahl Dispersion zerlegen
Die Voraussetzung für die Interferenz des Lichtes sind .... Wellenzüge, die eine .... haben. Lichtwellen von zwei verschiedenen Lichtquellen .... nicht.	Phasendifferenz kohärent Wellenzug interferieren
Licht hat die Eigenschaften einer .... Das zeigt sich in der Möglichkeit der .... des Lichtes. Mit Hilfe eines .... kann Licht linear polarisiert werden.	Polarisator Transversalwelle Polarisation

2.1.2. *Sprechen Sie zu den folgenden Begriffen!*
Verwenden Sie dabei die Fragen!

(1) Reflexion

Unter welchen Bedingungen findet Reflexion statt?
Welches Gesetz gilt für die Reflexion? Formulieren Sie das Gesetz in Worten!
Unter welcher Bedingung kann man einen Körper sehen, der nicht selbst leuchtet?

(2) Brechung

Unter welcher Bedingung findet Brechung statt?
Was ist die Ursache der Brechung?
Welches Gesetz gilt für die Brechung? Formulieren Sie das Gesetz in Worten!
Unter welchen Bedingungen wird ein Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen?

(3) Dispersion

Unter welcher Bedingung findet Dispersion statt?
Warum wird Licht beim Durchgang durch ein Prisma in seine Spektralfarben zerlegt?
Wie werden die einzelnen Farben gebrochen?

(4) Totalreflexion

Unter welchen Bedingungen findet Totalreflexion statt?
Welches Gesetz gilt für die Totalreflexion? Formulieren Sie dieses Gesetz in Worten!

(5) Beugung

Unter welcher Bedingung tritt Beugung auf?
Was ist Beugung?
Erklären Sie die Beugung am Spalt!

(6) Interferenz

Unter welcher Bedingung interferieren Wellen?
Was versteht man unter Interferenz?
Erklären Sie die Interferenz durch Beugung am Doppelspalt!
Welchen Einfluß hat die Interferenz auf die Intensität des Lichtes?

2.1.3. *Ergänzen Sie den Text!*

reflektieren, brechen, beugen, interferieren

Nicht selbst leuchtende Körper kann man nur sehen, weil sie Licht .... Eine Welle wird ...., wenn sie in ein anderes Medium übergeht. Wenn eine Welle durch einen Spalt geht, so wird sie .... Wellen können nur miteinander ...., wenn sie kohärent sind.	brechen reflektieren interferieren beugen

2.2. Wichtige Begriffe

2.2.1. *Ordnen Sie* die folgenden Begriffe nach Geräten, Vorgängen, Modellen und Eigenschaften!

Polarisator, Polarisierbarkeit, Polarisationsfilter, Reflexion, Gitter, Beugung, Linse, Dispersion, Lichtstrahl, Totalreflexion, Fernrohr, Schirm, Interferenz

2.2.2. *Ordnen Sie* den Substantiven die entsprechenden Adjektive *zu*, und *erklären Sie* die Bedeutung der Begriffe!

kontinuierlich	Spektrum
lichtdurchlässig	Medium
einfarbig	Licht
kohärent	
sichtbar	

2.2.3. *Bilden Sie* zu den Adjektiven der Übung 2.2.2. die Antonyme!

Antonyme

2.3. Wellenlänge und Lichtgeschwindigkeit

2.3.1. *Fragen Sie* Ihren Freund nach Wellenlängen des Lichtes in Abhängigkeit von der Farbe und nach Lichtgeschwindigkeiten in den verschiedenen Medien!
Benutzen Sie dazu eine entsprechende Tabelle!

2.3.2. *Nennen Sie* die Bedeutung der Begriffe „optisch dichter" und „optisch dünner"!

2.4. Beugung und Interferenz

Erklären Sie die Abbildungen 32.11 (vgl. S. 310)!

2.5. Wichtige Gleichungen für Lichtwellen

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $c = \lambda \cdot f$

(2) $\dfrac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \dfrac{c_1}{c_2} = n_{1,2}$

(3) $\sin\alpha = \dfrac{1}{n_{1,2}}$

(4) $\lambda : b = s_1 : e$

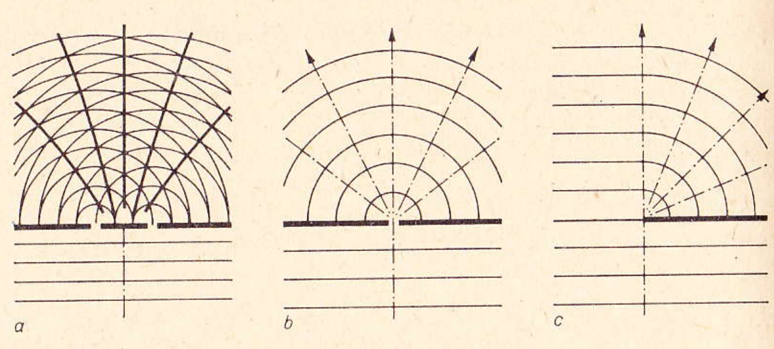


Abb. 32.11.

2.6. Experimente mit Lichtwellen

Konzessivsatz

Begründen Sie die folgenden experimentellen Beobachtungen!

(1) Obwohl sich zwei Lichtwellen überlagern, gibt es keine Interferenzerscheinungen.
(2) Obwohl das Licht durch einen Spalt geht, entsteht kein Beugungsspektrum.
(3) Es tritt keine Totalreflexion ein, obwohl der Lichtstrahl vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium geht.
(4) Hinter dem Doppelspalt gibt es keine Interferenzerscheinungen, obwohl Licht auf den Doppelspalt fällt.
(5) Obwohl der Lichtstrahl durch ein Prisma geht, entsteht kein Dispersionsspektrum.

3. Übungen zum Thema

3.1. Experiment zur Interferenz

Beschreiben Sie den Aufbau und die Ergebnisse eines Versuchs zur Interferenz durch Beugung am Doppelspalt, und *beantworten Sie* dazu auch folgende Fragen!

(1) Wovon hängt die Lage der Verstärkungsgebiete ab?
(2) Welche Möglichkeiten ergeben sich aus dem Versuch bei Verwendung von monochromatischem Licht?
(3) Warum bekommen die Verstärkungsgebiete bei Verwendung von weißem Licht farbige Ränder?

3.2. Experiment zur Bestimmung der Wellenlänge

Sprechen Sie über einen Versuch zur Bestimmung der Wellenlänge einer monochromatischen Strahlung!

3.3. Elektromagnetisches Spektrum

Sprechen Sie über das elektromagnetische Spektrum, indem Sie das Gemeinsame und die wesentlichen Unterschiede der Arten der elektromagnetischen Wellen hervorheben!

3.4. Vergleich verschiedener Wellen

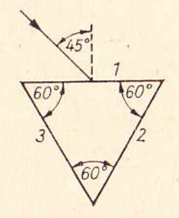
Vergleichen Sie Schallwellen, *Hertz*sche Wellen und Lichtwellen bezüglich ihrer Erzeugung, der Wellenlänge und Frequenz und der Anwendungsgebiete!

4. Textaufgaben

194. Auf die Fläche 1 des in Abb. 32.12. dargestellten Glasprismas mit der Brechungszahl $n_{1,2} = 1{,}7$ fällt unter einem Winkel von 45° ein Lichtstrahl. Unter welchem Winkel verläßt der Strahl das Prisma, wenn
a) die Flächen 2 und 3 durch Metallbelag spiegeln,
b) nur die Fläche 2 spiegelt und
c) keine Fläche spiegelt?

195. Unter welchem Winkel tritt der Lichtstrahl aus dem in Abb. 32.13. abgebildeten Prisma wieder aus? ($n = 1{,}65$)

196. Ein Mensch befindet sich 12 m unter Wasser. Infolge der Totalreflexion ist die Wasseroberfläche für ihn nur innerhalb eines Kreises durchsichtig. Berechnen Sie den Durchmesser dieses Kreises! ($n_{\text{Luft-Wasser}} = 1{,}33$)



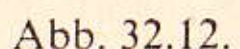


Abb. 32.12.

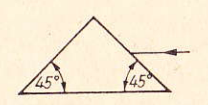


Abb. 32.13.

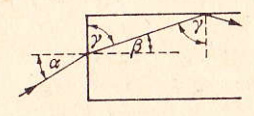


Abb. 32.14.

197. a) Welche Brechungszahl muß der zylindrische Glasstab der Abb. 32.14. mindestens haben, wenn alle an der Vorderseite eintretenden Lichtstrahlen infolge Totalreflexion im Stab bleiben sollen?
b) Wie groß darf der Eintrittswinkel α höchstens sein, wenn eine Brechungszahl von $n = 1{,}33$ angenommen wird und das Licht im Stab bleiben soll?

198. Bei einem Interferenzversuch am Doppelspalt werden folgende Werte gemessen: Der Abstand der Spalte beträgt 0,5 mm. Der Schirm ist 3000 mm vom Doppelspalt entfernt. Die beiden Verstärkungsgebiete erster Ordnung haben einen Abstand von 6 mm voneinander. Wie groß ist die Wellenlänge des für diesen Versuch benutzten Lichtes?

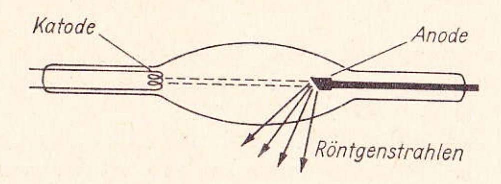
199. Bei einem Interferenzversuch mit rotem Licht benutzt man ein optisches Gitter, dessen Spalte einen Abstand von 0,04 mm haben. Die beiden Streifen 2. Ordnung haben einen Abstand von 17 cm voneinander. Das Gitter ist vom Schirm 2,50 m entfernt. Wie groß ist die Wellenlänge des benutzten Lichtes?

33. Röntgenstrahlung und Gammastrahlung

Der deutsche Physiker *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923) entdeckte 1895 eine Strahlenart, die er X-Strahlen nannte. Heute wird sie nach ihm auch *Röntgen*strahlung genannt. Für seine Untersuchungen an dieser Strahlung erhielt *Röntgen* 1901 den *Nobel*preis für Physik.
Wenn die besonderen Bedingungen der Entdeckung dieser Strahlung auch zufällig waren, so war diese Entdeckung doch ein notwendiger Schritt auf dem Wege der Erkenntnis der Materie. Sicher hätten auch andere Wissenschaftler diese Entdeckung machen können. Sie gelang *Röntgen*, weil er seine Untersuchungen genauer und sorgfältiger als andere Wissenschaftler durchgeführt hatte. Im Gegensatz zu vielen anderen Entdeckern seiner Zeit ließ *Röntgen* seine Entdeckung nicht patentieren, um dadurch anderen Wissenschaftlern die Möglichkeit zu geben, seine Forschungen weiterzuentwickeln und zu nutzen.

33.1. Das Wesen der Röntgenstrahlung

*Röntgen*strahlen entstehen beim Auftreffen von Elektronen auf bestimmte Stoffe. Man erzeugt sie heute mit Hilfe von Glühkatodenröhren.
Die Glühkatodenröhre besteht aus einer Katode und einer Anode. Sie befinden



sich in einer Röhre mit Vakuum. Wenn die Katode erwärmt wird, so treten aus ihr Elektronen heraus.
Die aus der Katode austretenden Elektronen werden durch eine Spannung U zwischen Katode und Anode beschleunigt und treffen auf die Anode auf. Es entsteht die *Röntgen*strahlung, die im allgemeinen aus zwei Anteilen besteht: der Bremsstrahlung und der charakteristischen Strahlung.
Die Bremsstrahlung hat ihre Ursache im schnellen Abbremsen eines Elektronenstromes auf der Oberfläche der Anode. Die von den Elektronen abgegebene kinetische Energie führt zur Erzeugung einer elektromagnetischen Strahlung. Diese Strahlung ergibt ein kontinuierliches Spektrum. Der zweite Anteil ist die charakteristische Strahlung. Sie hängt von der Art des Anodenmaterials ab, weil sie durch Vorgänge in den Atomhüllen des Anodenmaterials entsteht. Sie ergibt ein Linienspektrum. Beide Anteile überlagern sich und bilden die *Röntgen*strahlung.
Mit Hilfe von Beugungs- und Interferenzversuchen wurde festgestellt, daß *Röntgen*strahlen elektromagnetische Wellen mit sehr kleiner Wellenlänge sind. Sie liegt in der Größenordnung der Abstände der Atome in einem Kristallgitter. Man konnte Wellenlängen zwischen 10 nm und 0,1 pm messen.

33.2. Eigenschaften und Anwendung der Röntgenstrahlen

Die *Röntgen*strahlung hat ähnliche Eigenschaften wie das Licht, ist aber unsichtbar. Beim Auftreffen auf bestimmte Körper ruft sie Lichtwirkungen hervor, die man Fluoreszenz nennt. Außerdem hat die *Röntgen*strahlung fotografische Wirkungen wie das Licht. Sie kann schließlich Stoffe ionisieren, das heißt, Elektronen aus ihren Atomen lösen. Mit Hilfe dieser Eigenschaften kann man ihre Intensität messen. Die *Röntgen*strahlung ist sehr durchdringungsfähig und zeichnet deutliche Bilder von Körpern auf einem Fluoreszenzschirm.
In der Technik werden *Röntgen*strahlen vor allem zu Strukturuntersuchungen verwendet. Bei Grobstrukturuntersuchungen werden Werkstoffe auf Homogenität untersucht. Dabei können Fehler und Risse in Schweißnähten oder Gußstücken festgestellt werden. Die Untersuchung kann ohne Zerstörung des Werkstückes erfolgen. Bei Feinstrukturuntersuchungen werden z. B. der Zustand eines Kristalls und die Abstände der Atome im Kristallgitter bestimmt. Auch das ist ein wichtiges Mittel zur Werkstoffprüfung für den Techniker.
In der Medizin werden *Röntgen*strahlen zur Diagnose und zur Therapie benutzt. Mit Hilfe dieser Strahlung können krankhafte Veränderungen im menschlichen Körper festgestellt oder Fremdkörper sichtbar gemacht werden. Das sind Beispiele für die Diagnose. Bei der Therapie werden krankhafte Gewebe, besonders krebsartige Erscheinungen, bestrahlt und dadurch zerstört oder im Wachstum beeinflußt.
Personen, die mit *Röntgen*strahlen arbeiten, müssen vor der Wirkung der Strahlen auf gesunde Gewebe geschützt werden.

33.3. Die Gammastrahlung

Noch kürzere Wellenlängen als die *Röntgen*strahlung hat die Gammastrahlung. Sie entsteht beim radioaktiven Zerfall der Elemente. Sie wurde von dem Ehepaar *Pierre* und *Marie Curie* 1898 entdeckt. Die Gammastrahlung kommt zustande, weil ein Atomkern nach dem radioaktiven Zerfall in einem angeregten Zustand zurückbleibt. Der Kern gibt dann seine frei werdende Energie in Form dieser kurzwelligen elektromagnetischen Strahlung ab.
Die Gammastrahlung breitet sich wie das Licht und die *Röntgen*strahlung aus. Sie ist aber noch durchdringungsfähiger als die *Röntgen*strahlung.

Wortliste zum Text

ab/bremsen A
bestrahlen A
die Bremsstrahlung
die Diagnose, -n
durchdringungsfähig
der Durchgang, ¨-e
entdecken A
die Feinstruktur, -en
die Fluoreszenz
der Fluoreszenzschirm, -e
der Fremdkörper, -
die Gammastrahlung
das Gewebe, -
die Glühkatodenröhre, -n
das Gußstück, -e
heilen (sein, A haben)
die Homogenität, o.
ionisieren A
die Katode, -n
krankhaft
krebsartig
das Kristallgitter, -
das Linienspektrum, -spektren
der Nobelpreis, -e
patentieren A
radioaktiv
der Riß, Risse
die Röntgenstrahlung
der Schutz, o.
schützen A
die Schweißnaht, ¨-e
sorgfältig
die Strukturuntersuchung, -en
weiter/entwickeln A (sich)
der Werkstoff, -e
die Werkstoffprüfung
das Wesen
der Zerfall, o.
zerstören A
zufällig
zurück/bleiben
blieb zurück, zurückgeblieben (sein)
zustande/kommen
kam zustande, zustandegekommen (sein)

Übungen

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wie entstehen *Röntgen*strahlen?
2) Aus welchen Anteilen bestehen die *Röntgen*strahlen?
3) Welche Ursachen haben Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung?

4) Welche Wellenlängen haben *Röntgen*strahlen?
5) Welche Eigenschaften haben *Röntgen*strahlen?
6) Wozu verwendet man die *Röntgen*strahlung in der Technik?
7) Welche Rolle spielen *Röntgen*strahlen in der Medizin?
8) Bei welchem Prozeß entsteht die Gammastrahlung?
9) Wodurch unterscheiden sich Gammastrahlen von *Röntgen*strahlen?
10) Woraus besteht eine Glühkatodenröhre zur Erzeugung von *Röntgen*strahlen?

2. Übungen zum Text

2.1. Röntgenstrahlung und ihre Eigenschaften

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Wenn schnelle Elektronen auf bestimmte Stoffe treffen, entstehen .... Man unterscheidet zwei Arten dieser Strahlung: .... und .... *Röntgen*strahlen sind .... mit sehr kleiner Wellenlänge. *Röntgen*strahlung hat ähnliche Eigenschaften wie das ...., ist aber sehr .... und zeichnet Bilder von Körpern auf einem .... In der Technik verwendet man die Strahlung zu .... In der Medizin benutzt man sie zur .... und zur ....

charakteristische Strahlung
Bremsstrahlung
elektromagnetische Welle
Licht
*Röntgen*strahlen
Fluoreszenzschirm
durchdringungsfähig
Diagnose
Strukturuntersuchung
Therapie

2.1.2. *Bilden Sie Satzgefüge mit Konzessivsätzen!*

Konzessivsatz

(1) *Röntgen*strahlen sind auch elektromagnetische Wellen. Sie unterscheiden sich in einigen Eigenschaften vom Licht.
(2) Die Wellenlängen von *Röntgen*strahlen sind sehr klein. Man kann sie experimentell bestimmen.
(3) *Röntgen*strahlen werden in der Diagnostik verwendet. Röntgenstrahlen zerstören gesundes Gewebe.
(4) Man konnte den Wellencharakter von *Röntgen*strahlen nachweisen. Ihre Wellenlängen sind sehr klein.

2.2. Entstehung und Arten von Röntgenwellen

2.2.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

(1) Wie erzeugt man *Röntgen*strahlen?
(2) Beschreiben Sie den Bau und die Funktion einer Glühkatodenröhre! (Vgl. Abb. 33.1.)
(3) Welche Arten von *Röntgen*strahlung unterscheidet man?
(4) Unterscheiden Sie Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung hinsichtlich ihrer Entstehung und der Spektren dieser Strahlung!

2.2.2. *Sprechen Sie* über die Entstehung und die Arten der *Röntgen*strahlung! Beachten Sie dazu Übung 2.2.1.!

2.3. Eigenschaften der Röntgenstrahlung

Nennen und *beschreiben Sie* die verschiedenen Eigenschaften der *Röntgen*strahlen!

2.4. Anwendung der Röntgenstrahlung

2.4.1. *Sprechen Sie* über die Anwendung der *Röntgen*strahlen bei der Werkstoffprüfung!

2.4.2. *Sprechen Sie* über Möglichkeiten der Anwendung der *Röntgen*strahlen in der Medizin!

2.5. Gammastrahlung

2.5.1. *Sprechen Sie* über die Entstehung und die Eigenschaften der Gammastrahlung!

2.5.2. *Unterscheiden Sie Röntgen-* und Gammastrahlung bezüglich der Durchdringungsfähigkeit und ihrer Anwendung!

3. Übungen zum Thema

3.1. Strahlungen

die Strahlung

Definieren Sie die Begriffe!

Röntgenstrahlung, Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung, Gammastrahlung, elektromagnetische Strahlung, Alphastrahlung, Betastrahlung

3.2. Umwandlung der Energie der Röntgenstrahlung

Nennen Sie Beispiele für die Umwandlung der Energie der Röntgenstrahlung in Lichtenergie, Wärmeenergie und chemische Energie!

3.3. Strahlenschutz

Sprechen Sie über die Notwendigkeit und die technische Realisierung des Strahlenschutzes!
Gehen Sie im Zusammenhang damit auch auf die politische Verantwortung des Wissenschaftlers ein!

3.4. Röntgendiagnostik

Sprechen Sie über die Röntgendiagnostik!
Gehen Sie von den Eigenschaften der *Röntgen*strahlung aus, und unterscheiden Sie *Röntgen*durchleuchtung, *Röntgen*schirmbildaufnahme und *Röntgen*aufnahme! Informieren Sie sich darüber in einem Lehrbuch der Physik!

3.5. Röntgentherapie

bestrahlen A, die Bestrahlung

Beantworten Sie die Fragen!

(1) Was bestrahlt man bei der *Röntgen*therapie?
(2) Womit bestrahlt man krankhafte Gewebe?
(3) Welche Arten der Bestrahlung kennen Sie?
(4) Warum werden *Röntgen*strahlen in der Therapie verwendet?

34. Dialektische Einheit von Wellen- und Teilchenaspekt des Lichtes

34.1. Die Entwicklung der Lichttheorien

Die Entwicklung der Optik führte bereits im 17. Jahrhundert zur Frage nach dem Wesen des Lichtes. Die Wissenschaftler dieser Zeit versuchten, ein Modell des Lichtes zu schaffen. Das Modell sollte die Möglichkeit geben, alle bekannten optischen Erscheinungen und Gesetze mit einfachen Mitteln zu beschreiben und zu erklären. Wegen der großen Bedeutung, die die Mechanik damals besaß, kamen nur mechanische Modelle in Frage. So wurden zwei Modelle des Lichtes entwickelt, das Teilchen- und das Wellenmodell.
Das Teilchenmodell des Lichtes wurde vor allem von *Isaac Newton* (1643–1727) vertreten. Mit Hilfe dieses Modells konnte er viele optische Erscheinungen, wie Reflexion und Brechung, widerspruchsfrei beschreiben und erklären. Die Reflexion des Lichtes erklärte er zum Beispiel als Stoß elastischer Kugeln an einer Wand. Die Interferenz des Lichtes konnte er aber nur durch Einführung von Hypothesen erklären. So mußte er seinen Lichtteilchen bestimmte periodische Eigenschaften zuordnen, um das Verhalten des Lichtes bei der Interferenz zu verstehen.

Daneben gab es noch ein Wellenmodell des Lichtes. Es wurde besonders von *Christian Huygens* (1629–1695) entwickelt und erklärte die Ausbreitung des Lichtes mit Hilfe von Elementarwellen. Zum Verständnis seiner Theorie mußte er die Hypothese des Lichtäthers einführen. Darunter verstand man einen elastischen Stoff, indem sich die Lichtwellen ausbreiten sollten, da man sich eine Wellenausbreitung ohne einen Stoff nicht vorstellen konnte. Mit dieser Theorie konnte man auch die Beugung und die Polarisation des Lichtes verstehen.
Allerdings führte die aus der Polarisation des Lichtes folgende Transversalität der Lichtwellen zu Widersprüchen mit der Ätherhypothese. *James Clark Maxwell* (1831–1879) ließ deshalb die Auffassung von einem mechanischen Lichtäther fallen und entwickelte eine elektromagnetische Lichttheorie. Danach sind die Lichtwellen eine besondere Art von elektromagnetischen Wellen. Das konnte auch experimentell von *Heinrich Hertz* (1857–1894) bestätigt werden.

34.2. Zur Entstehung der Quantentheorie des Lichtes

1888 entdeckte *Wilhelm Hallwachs* (1859–1922) den äußeren lichtelektrischen Effekt. Er besteht darin, daß Elektronen aus der Oberfläche von Metallen durch auffallende Lichtstrahlung herausgelöst werden.
Die experimentelle Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effekts hatte folgende Ergebnisse:

(1) Die Anzahl der herausgelösten Elektronen ist der Intensität des eingestrahlten Lichtes proportional.
(2) Das Herauslösen der Elektronen erfolgt auch bei sehr geringen Intensitäten des Lichtes.
(3) Die Elektronen werden erst dann herausgelöst, wenn die Frequenz des Lichtes gleich oder größer als eine für das Metall charakteristische Grenzfrequenz f_G ist.
(4) Die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen hängt von der Frequenz des Lichtes, aber nicht von seiner Intensität ab.

Diese experimentellen Ergebnisse lassen sich weder mit der Teilchen- noch mit der Wellentheorie des Lichtes erklären. *Albert Einstein* (1879–1955) entwickelte eine Theorie, die Quantentheorie des Lichtes, die den äußeren lichtelektrischen Effekt begründet. *Einstein* ging dabei von der von *Max Planck* (1858–1947) ausgearbeiteten Quantenhypothese aus.
Nach dieser Hypothese sollte die Aufnahme und Abgabe von Strahlungsenergie in bestimmten Energiequanten erfolgen. *Einstein* nahm nun an, daß das Licht auch in der Strahlung aus Lichtquanten oder Photonen besteht. Nach *Einsteins* Lichtquantentheorie besitzt jedes Photon die Quantenenergie:

Quantenenergie des Photons	$W = h \cdot f$

und für den äußeren lichtelektrischen Effekt gilt die Gleichung:

$$h \cdot f = W_{kin} + W_A$$

In diesen Gleichungen ist h das von *Max Planck* gefundene Wirkungsquantum. Es ist eine universelle Naturkonstante und beträgt $6{,}625 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Ws}^2$. f ist die Frequenz des Lichtes, W_{kin} die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen und $W_A = h \cdot f_G$ die zum Herauslösen der Elektronen erforderliche Ablösearbeit.
Für die experimentellen Ergebnisse des äußeren lichtelektrischen Effekts ergibt sich mit dem Quantenmodell eine widerspruchsfreie Erklärung:
Die Herauslösung von Elektronen aus dem Metall bei Lichteinstrahlung erfolgt nur dann, wenn die Energie eines Photons größer oder gleich der Ablösearbeit ist, d. h., wenn $h \cdot f \geqq h \cdot f_G$ erfüllt ist. W_A ist von der Art des Materials abhängig. Wenn die Energie des Photons größer als die Ablösearbeit W_A ist, so erhalten die herausgelösten Elektronen eine kinetische Energie, die proportional zur Frequenz f des Lichtes ist. Ist jedoch die Quantenenergie $h \cdot f$ kleiner als die Ablösearbeit, so kann auch durch eine beliebige Vergrößerung der Lichtintensität, d. h. Vergrößerung der Anzahl der Photonen, kein Elektron aus dem Metall herausgelöst werden. Damit ist die Existenz einer Grenzfrequenz beim äußeren lichtelektrischen Effekt erklärt. Gleichzeitig ist dieses Ergebnis eine Bestätigung der von *Planck* aufgestellten Quantenhypothese.

34.3. Zum Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes

Das von *Einstein* entwickelte Quanten- oder Photonenmodell des Lichtes zeigt in mancher Beziehung Übereinstimmung mit dem Teilchenmodell, das durch die großen Erfolge der Wellentheorie des Lichtes ganz in den Hintergrund getreten war. Es ist aber auch keine einfache Rückkehr zum ursprünglichen Teilchenmodell. Das Quantenmodell des Lichtes vereinigt in sich Aspekte sowohl des Teilchen- wie des Wellenmodells des Lichtes. So erinnert die Existenz von Energiequanten an das Teilchenmodell, die Eigenschaft einer Frequenz aber an das Wellenmodell. Man spricht deshalb von einem Dualismus von Wellen- und Teilchenaspekt des Lichtes und meint damit, daß ein Modell allein nicht genügt, um alle Eigenschaften des Lichtes zu erklären.
Die Entwicklung des Quantenmodells des Lichtes ist damit ein Beispiel für die Dialektik der physikalischen Erkenntnisgewinnung. Die neue Erkenntnis löst den Widerspruch der ursprünglichen theoretischen Auffassungen und stellt auf einer höheren Entwicklungsstufe eine Synthese der ursprünglichen Auffassungen dar. Wegen der scheinbaren Rückkehr zu ursprünglichen Anschauungen nennt man diese Erscheinung auch Negation der Negation. Zwischen der Kontinuität (Wellenmodell) und der Diskontinuität (Teilchenmodell) der Lichterscheinung besteht ein dialektischer Widerspruch.
Diese Dialektik der Erkenntnisgewinnung ist nicht auf das Licht beschränkt, sondern zeigt sich bei anderen physikalischen Erscheinungen ebenso. Für Mikro-

objekte mit Teilchencharakter wurden zum Beispiel Beobachtungen gemacht, die nur durch ein Wellenmodell erklärt werden können. So zeigen Atome und Elektronen unter bestimmten Bedingungen Welleneigenschaften. Man spricht in diesem Zusammenhang von Materiewellen. Auch hier drückt sich die Dialektik der Erkenntnisgewinnung aus.

Wortliste zum Text

die Ablösearbeit, –en
der Aspekt, –e
auf/fallen
fiel auf, aufgefallen (sein)
besitzen A
besaß, besessen
der Dualismus, o.
ein/strahlen A
Einstein, Albert
das Energiequant, –en
in Frage kommen
führen A (zu D)
die Grenzfrequenz, –en
Hallwachs, Wilhelm
heraus/lösen A
der Hintergrund, ⸚e
die Kugel, –n
der Lichtäther, o.
lichtelektrisch
das Mikroobjekt, –e
das Photon, –en
Planck, Max
das Quant, –en
die Quantentheorie, o.
die Rückkehr, o.
scheinbar
die Synthese, –n
die Theorie, –n
die Transversalität
universell
ursprünglich
vertreten A
vertrat, vertreten
widerspruchsfrei
das Wirkungsquantum, o.

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Modelle des Lichtes wurden im 17. Jahrhundert entwickelt?
2) Welche Auffassung vom Licht vertrat *Newton*?
3) Welche Theorie vom Licht entwickelte *Huygens*?
4) Warum entwickelte *Maxwell* die elektromagnetische Lichttheorie?
5) Was versteht man unter dem äußeren lichtelektrischen Effekt?
6) Welchen Inhalt hat die Quantenhypothese von *Max Planck*?
7) Was versteht man unter der Quantenenergie eines Photons?
8) Unter welchen Bedingungen können nach der Quantentheorie Elektronen aus einem Metall herausgelöst werden?
9) Wieso enthält das Quantenmodell des Lichtes Aspekte des Teilchen- und des Wellenmodells?
10) Was versteht man unter Negation der Negation im Erkenntnisprozeß?

2. Übungen zum Text

2.1. Entwicklung der Lichttheorie

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Zwei wichtige Modelle zur Beschreibung der verschiedenen Erscheinungen des Lichtes sind das .... und das .... Während das Teilchenmodell besonders von .... entwickelt wurde, wurde das .... von *Huygens* vertreten. Zur Erklärung seiner Theorie führte *Huygens* den ... . ein. Im 19. Jahrhundert entwickelte *J. C. Maxwell* eine .... Lichttheorie.

elektromagnetisch
Newton
Teilchenmodell
Wellenmodell
Lichtäther

2.1.2. *Bilden Sie Satzgefüge mit Konzessivsätzen* nach folgendem Muster!

Konzessivsatz

Newton konnte mit dem Teilchenmodell die Reflexion des Lichtes erklären. Bei der Erklärung der Interferenz genügte das Teilchenmodell allein nicht.

► Obwohl *Newton* die Reflexion des Lichtes mit dem Teilchenmodell erklärte, genügte bei der Erklärung der Interferenz das Teilchenmodell allein nicht.

(1) Bei der Erklärung der Interferenz traten Widersprüche auf. *Newton* konnte die Brechung des Lichtes mit dem Teilchenmodell widerspruchsfrei erklären.
(2) Bei der Erklärung der Polarisation traten Widersprüche mit der Ätherhypothese auf. *Huygens* konnte die Beugung des Lichtes mit dem Wellenmodell und dem Lichtäther widerspruchsfrei erklären.
(3) Viele Eigenschaften des Lichtes können mit der elektromagnetischen Lichttheorie erklärt werden. Es gibt Eigenschaften, die man damit nicht erklären kann.

2.1.3. *Sprechen Sie* in einem Kurzvortrag über die Entwicklung der Lichttheorie, indem Sie auf die Auffassungen von *Newton*, *Huygens*, *Maxwell* und *Einstein* eingehen!

2.2. Äußerer lichtelektrischer Effekt

2.2.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Fällt Licht auf eine Metallplatte, so können aus dieser Platte Elektronen .... Diese Erscheinung nennt man .... Die Energie der herausgelösten Elektronen ist .... von der Intensität des Lichtes. Diese kinetische Energie hängt aber von der .... des Lichtes ab. Sind die Frequenzen des auffallenden Lichtes kleiner als eine ...., so werden keine .... aus der Metallplatte ....

Frequenz
unabhängig
äußerer lichtelektrischer Effekt
Grenzfrequenz
Elektronen
herauslösen

2.2.2. *Formulieren Sie* die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen des äußeren lichtelektrischen Effekts!

2.2.3. *Erläutern Sie* die in Übung 2.2.2. formulierten Ergebnisse mit Hilfe des Photonenmodells!

2.2.4. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen! (Vgl. S. 29)

(1) $W \doteq h \cdot f$ (3) $h \cdot f = W_{kin} + W_A$

(2) $W_A = h \cdot f_A$

2.2.5. *Interpretieren Sie* folgende Aussage!
Aus einer Metallplatte werden bei Lichteinstrahlung nur dann Elektronen herausgelöst, wenn

$h \cdot f > h \cdot f_G$ ist.

2.3. Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes

Sprechen Sie über den Dualismus des Lichtes!

3. Übungen zum Thema

3.1. Plancksches Wirkungsquantum

Beschreiben Sie ein Experiment zur Bestimmung des *Planck*schen Wirkungsquantums, das auf der Gegenfeldmethode beruht!

(Theoretische Grundlagen, Geräteanordnung, Interpretation der Meßergebnisse der Methode)

3.2. Lichtmodelle

Vergleichen Sie die verschiedenen Lichtmodelle bezüglich ihrer Anwendungsmöglichkeiten und ihrer Grenzen!

3.3. Entwicklung der Lichttheorie

Erklären Sie am Beispiel der Entwicklung der Lichttheorie (*Newton*, *Huygens*, *Maxwell*, *Einstein*) die Dialektik der Erkenntnisgewinnung!

3.4. Negation der Negation

Nennen und *erklären Sie* Beispiele, an denen man das Wirken des Gesetzes der Negation der Negation erkennen kann!

3.5. Wichtige Begriffe

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach Vorgängen, Objekten und physikalischen Größen!

Interferenz, Lichtquant, Frequenz, Wirkungsquantum, Welle, Polarisation, Wellenlänge, Schwingung, Intensität, Absorption

4. Textaufgaben

200. Welche Quantenenergie hat ein Photon der Wellenlänge 589,3 nm?

201. Oberhalb welcher Wellenlänge des bestrahlenden Lichtes kann bei einer Kaliumkatode kein äußerer lichtelektrischer Effekt mehr eintreten, wenn die Ablösearbeit $W_A = 1,83$ eV beträgt?

($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J)

202. Mit welcher Wellenlänge wird eine Metallkatode bestrahlt, wenn bei einer Ablösearbeit von 2,8 eV die Geschwindigkeit der herausgelösten Elektronen 1 200 km/s beträgt?
(Masse eines Elektrons: $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ kg)

Zusammenfassende Übungen zu Schwingungen und Wellen

Zur Grammatik

1. Angabe einer Einräumung

1.1. Zusammenstellung der Grammatik

Einräumungen können ausgedrückt werden

(1) durch einen Konzessivsatz mit **„obwohl"** oder **„obgleich"**.

► Obwohl (obgleich) *Newton* mit dem Teilchenmodell viele Eigenschaften des Lichtes erklären konnte, genügte bei der Erklärung der Interferenz das Teilchenmodell allein nicht.

(2) durch eine präpositionale Wortgruppe mit **„trotz"**.

► Trotz der Erklärung vieler Lichteigenschaften mit dem Teilchenmodell genügte das Modell bei der Erklärung der Interferenz nicht.

(3) mit **„trotzdem"** oder **„dennoch"** im folgenden Satz.

► *Newton* erklärte viele Eigenschaften des Lichtes mit dem Teilchenmodell. Trotzdem (dennoch) gelang es nicht, die Interferenz mit dem Teilchenmodell zu erklären.

1.2. Übung

Bilden Sie aus jeweils zwei Sätzen einen Satz oder eine Satzverflechtung entsprechend 1.1., und *erläutern Sie* den beschriebenen Sachverhalt!

(1) Bei einem schwingenden Körper ist die wirkende Kraft in der Nullage null.
Der Körper bewegt sich über die Nullage hinaus.
(2) Einem schwingungsfähigen System wird ständig Energie zugeführt.
Nicht immer entsteht eine ungedämpfte Schwingung.
(3) Bei zwei Schwingungen tritt Resonanz auf.
Die Amplituden bleiben relativ klein.
(4) Einem Körper wird Energie zugeführt.
Der Körper schwingt nicht.
(5) *Maxwell* sagte die Existenz von elektromagnetischen Wellen voraus.
Er konnte die Existenz der elektromagnetischen Wellen nicht nachweisen.

Zu Wortschatz und Wortbildung

1. Zusammengesetzte Substantive

1.1. *Bilden Sie* aus den folgenden Wörtern zusammengesetzte Substantive mit „Schwingung" oder „Welle"! *Sprechen Sie* über die Bedeutung der neuen Begriffe!

Dauer, Teil, Länge, Front, Pendel, Normale, Richtung, transversal, eigen, elementar

1.2. *Beantworten Sie* die folgenden Fragen!

Was versteht man unter

*Röntgen*strahlung, Bremsstrahlung, Lichtstrahlung, Gammastrahlung, Kreisfrequenz, Eigenfrequenz, Erregerfrequenz, Grenzfrequenz, Phasenwinkel, Phasenkonstante, Phasendifferenz?

1.3. *Nennen Sie* verschiedene Arten *Hertz*scher Wellen!

2. Die Begriffe Schwingung und Welle

Definieren Sie die folgenden Begriffe!

mechanische Schwingung,
harmonische Schwingung,
gedämpfte Schwingung,
freie Schwingung,
erzwungene Schwingung,

mechanische Welle,
harmonische Welle,
elektromagnetische Welle,
elektromagnetische Schwingung,
ungedämpfte Schwingung

3. Zusammengesetzte Adjektive und Partizipien

Unterstreichen Sie in den Fragen die zusammengesetzten Adjektive und Partizipien, und *beantworten Sie* dann die Fragen!

(1) Was versteht man unter einem schwingungsfähigen System?
(2) Welche Beispiele gibt es für durchdringungsfähige Strahlung?
(3) Was wissen Sie über Richtung und Betrag der rücktreibenden Kraft bei einer harmonischen Schwingung?
(4) Was versteht man unter einer hochfrequenten Schwingung?

4. Wörter in antonymischer Bedeutung

Nennen Sie zu den folgenden Wörtern Antonyme, und *erläutern Sie* den Gegensatz an einem Beispiel!

kontinuierliches Spektrum, sichtbares Licht, kohärentes Licht, lichtdurch-

lässiger Stoff, harmonische Welle, gedämpfte Schwingung, erzwungene Schwingung.

5. **Substantive und Verben**

Nennen Sie zu den folgenden Verben entsprechende Substantive, und erläutern Sie ihre Bedeutung!
reflektieren, brechen, beugen, interferieren, polarisieren, ionisieren, analysieren

6. **Begriffe und Oberbegriffe**

Suchen Sie zu jedem Begriff einen Oberbegriff!
Frequenz, Triode, Schwingung, Hertz, Periode, Welle, Prisma, Glühkatodenröhre, Amplitude, Reflexion, Beugung, Linse

Fortsetzung Mechanik

35. Reibung

Im Text 23. wurden das Trägheitsgesetz und das Grundgesetz der Dynamik behandelt. Es wurde festgestellt, daß sich ein Körper unter dem Einfluß einer konstanten Kraft gleichmäßig beschleunigt bewegt. In der Praxis beobachten wir aber häufig, daß Objekte sich geradlinig gleichförmig bewegen, obwohl ständig eine Kraft in Bewegungsrichtung auf sie wirkt. Ein Beispiel dafür ist eine Straßenbahn, die ständig eine Antriebskraft braucht, um auf einer geraden, horizontalen Strecke mit konstanter Geschwindigkeit zu fahren. Die wirkende Kraft dient hier nicht der Beschleunigung, sondern der Überwindung der Reibung. Wir betrachten noch ein weiteres Beispiel.
Auf einer waagerechten ebenen Fläche soll sich ein Holzquader mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Damit der Quader nicht zur Ruhe kommt, sondern sich mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegt, muß ständig eine bestimmte Kraft F in Richtung der Bewegung auf ihn wirken. Der Bewegung wirkt also ein Widerstand entgegen, den die Kraft F überwinden muß. Den Widerstand gegen die Bewegung des Körpers nennt man Reibungskraft.
Wir unterscheiden zwei Grundtypen der Reibung, die innere und die äußere Reibung. Die innere Reibung tritt bei der gegenseitigen Verschiebung von Teilchen einer Flüssigkeit oder eines Gases auf, die äußere Reibung wirkt zwischen festen Körpern. Bei der äußeren Reibung unterscheidet man je nach dem Bewegungszustand der festen Körper die Reibung der Ruhe und die Reibung der Bewegung. Der Text beschränkt sich auf die äußere Reibung.

35.1. Haftreibung (Reibung der Ruhe)

Ein quaderförmiger Körper liegt auf einer horizontalen ebenen Fläche (vgl. Abb. 35.1.). Wirkt auf ihn eine nicht zu große Kraft F* parallel zur Ebene, so bleibt der Körper zunächst in Ruhe. Es muß also eine Gegenkraft existieren, die

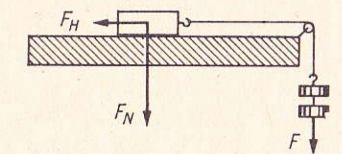


Abb. 35.1. Zur Haftreibung

* Hier und im folgenden werden die Beträge der Kräfte untersucht. Falls die Richtungen der Kräfte von Bedeutung sind, so werden sie besonders erwähnt.

der Kraft F entgegenwirkt und die Bewegung des Körpers verhindert. Diese Gegenkraft ist die Haftreibungskraft F_H. Sie tritt immer auf, wenn zwei Körper, die sich berühren, trotz einer Kraftwirkung auf den einen Körper parallel zur Berührungsfläche relativ zueinander in Ruhe bleiben. Die Haftreibung nennt man deshalb auch Reibung der Ruhe. Sie existiert nur, solange eine Kraft auf den Körper wirkt. Sonst würde sich der Körper durch die Haftreibungskraft bewegen, wenn die Kraft F null wird!
Wird die Kraft F vergrößert, so nimmt zunächst auch die Haftreibungskraft zu und der Körper bleibt weiter in Ruhe. Übersteigt aber F einen bestimmten Betrag, so beginnt der Körper zu gleiten. Die Haftreibungskraft F_H kann also nur bis zu einem bestimmten Maximalwert zunehmen. Es gilt:

Haftreibungskraft	$F_H < \mu_0 \cdot F_N$

Dabei ist F_N die Normalkraft, die durch das Gewicht des Körpers hervorgerufen wird, und μ_0 ist der Koeffizient (Reibungszahl) der Haftreibung. Er hängt von der Art der einander berührenden Flächen ab und ist durch den Maximalwert $F_{H_{max}}$ der Haftreibungskraft gegeben:

Haftreibungskoeffizient	$\mu_0 = \frac{F_{H_{max}}}{F_N}$

Die folgende Überlegung zeigt, wie μ_0 auf einfache Weise bestimmt werden kann. Wenn sich ein Körper mit dem Gewicht G auf einer geneigten Ebene befindet, bleibt er in Ruhe, solange die Parallelkomponente F_p (vgl. Abb. 35.2.) den Maximalwert der Haftreibungskraft nicht übersteigt. Erhöht man den Neigungswinkel, so vergrößert sich die Parallelkomponente. Der größte Neigungswinkel, bei dem der Körper noch in Ruhe bleibt, heißt Reibungswinkel. In diesem Falle ist

$$F_P = F_{H_{max}}$$
$$G \sin \alpha_R = \mu_0 G \cos \alpha_R$$

$\mu_0 = \tan \alpha_R$

Der Haftreibungskoeffizient ist gleich dem Tangens des Reibungswinkels.
Wird Getreide, Sand u. a. zu einem Haufen aufgeschüttet, so bildet sich ein Schüttwinkel α. Der Winkel charakterisiert einen Gleichgewichtszustand, bei dem

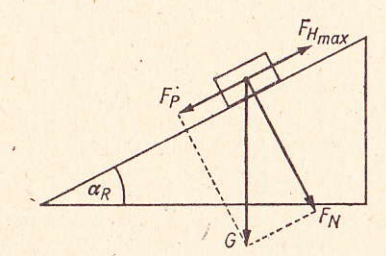


Abb. 35.2.
Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten

die Hangabtriebskraft (Parallelkomponente des Gewichts), die auf das aufgeschüttete Material wirkt, gleich der maximalen Haftreibungskraft ist. α ist also gleich dem Reibungswinkel. Die Höhe des Haufens hat auf den sich einstellenden Schüttwinkel keinen Einfluß (vgl. Abb. 35.3.).

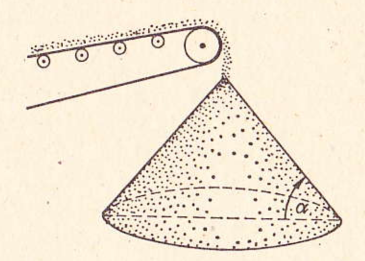


Abb. 35.3. Schüttwinkel

35.2. Reibung der Bewegung

Die Reibungskräfte an bewegten Körpern hängen wesentlich davon ab, ob der betrachtete Körper auf einem anderen Körper gleitet oder rollt. Demnach unterscheidet man Gleitreibung und Rollreibung.

35.2.1. Gleitreibung

Damit ein Körper auf einem anderen Körper mit konstanter Geschwindigkeit gleitet, muß ständig eine Kraft in Bewegungsrichtung auf ihn wirken. Zwischen beiden Körpern existiert deshalb eine Gleitreibungskraft F_G entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. Sie ist proportional zu der vom bewegten Körper bewirkten Normalkraft F_N:

Gleitreibungskraft	$F_G = \mu \cdot F_N$

μ ist der Koeffizient (die Reibungszahl) der Gleitreibung.
Er hängt u. a. von den Stoffen ab, aus denen die Körper bestehen. Die Tabelle 35.1. gibt einige Beispiele.

Tabelle 35.1. Reibungskoeffizienten

Stoffe	Gleitreibungskoeffizient	Haftreibungskoeffizient
Stahl auf Stahl	0,1	0,15
Metall auf Holz	0,2 bis 0,5	0,5 bis 0,6
Autorad auf Straße	0,5	–
Holz auf Holz	0,2 bis 0,4	0,65

Außerdem zeigt sie, daß der Gleitreibungskoeffizient stets kleiner als der Haftreibungskoeffizient ist. Übersteigt also in einer Anordnung nach Abb. 35.1. die Kraft F den Maximalwert der Haftreibungskraft, so bewegt sich der Körper beschleunigt, weil die Gleitreibungskraft kleiner als $F_{H_{max}}$ ist.

35.2.2. Rollreibung

Wenn ein Zylinder oder eine Kugel auf einer Ebene rollt, dann wirkt der Bewegung ein Widerstand entgegen, den wir als Rollreibung bezeichnen. Beim Rollen des Körpers auf einer Ebene entsteht durch das Gewicht des Körpers eine Verformung. Der rollende Körper und die Ebene berühren sich dadurch nicht nur in einem Punkt (bei einer rollenden Kugel) oder in einer Geraden (bei einem rollenden Zylinder), sondern in einer Fläche, die eine endliche Größe hat. Durch diese Verformung der beiden Körper entsteht die Rollreibungskraft F_{RR}, die der Rollbewegung entgegenwirkt. Praktische Untersuchungen ergeben die Beziehung (vgl. Abb. 35.4.):

Rollreibungskraft	$F_{RR} = \mu_R \frac{F_N}{r}$

F_N ist wieder die Normalkraft, die durch das Gewicht des rollenden Körpers bewirkt wird. μ_R ist der Koeffizient (die Reibungszahl) der Rollreibung. r ist der Radius des rollenden Körpers.

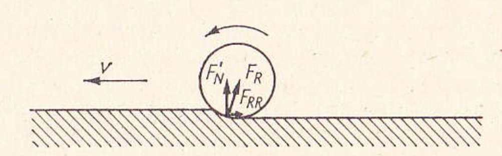


Abb. 35.4. Rollende Kugel auf einer Ebene

Die Gleichung zeigt, daß der Reibungskoeffizient hier in einer Längeneinheit zu messen ist. Weiter erkennt man, daß die Rollreibungskraft umso kleiner ist, je größer der Radius des rollenden Körpers ist. Sollen also Fahrzeuge dort fahren, wo der Koeffizient der Rollreibung groß ist, so erhalten sie große Räder. Bei schwierigen Bodenverhältnissen verwendet man z. B. Traktoren mit großen Rädern als Zugmaschinen.
Die Rollreibungskraft ist im allgemeinen viel kleiner als die Gleitreibungskraft. Deshalb wird in der Technik die Rollreibung gegenüber der Gleitreibung bevorzugt, wie z. B. bei Kugellagern und Rollenlagern.

35.2.3. Fahrwiderstand

Bei der Bewegung von Fahrzeugen treten verschiedene Reibungskräfte auf, die der Bewegung entgegenwirken. Neben der Rollreibungskraft gibt es auch den Luft-

widerstand. Alle bewegungshemmenden Kräfte faßt man in der Praxis zum sogenannten Fahrwiderstand zusammen:

Fahrwiderstand	$F_{RF} = \mu_F F_N$

Hier ist μ_F die Fahrwiderstandszahl. Sie hängt stark von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges ab.

35.3. Die Bedeutung der Reibung in der Praxis

Es gibt in der Praxis viele Vorgänge, bei denen die Reibung unerwünscht ist. Sie führt zur Abnutzung aller Maschinen und Vorrichtungen und bringt große Verluste an mechanischer Energie, da durch Reibung mechanische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Bei diesen Energieumwandlungsprozessen entsteht oft so viel Wärme, daß sie durch besondere Maßnahmen abgeführt werden muß. So müssen beim Bohren oder Fräsen das Werkzeug und das Werkstück durch eine Kühlflüssigkeit ständig gekühlt werden.
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Reibung zu verringern. Eine Möglichkeit ist die Schmierung der sich reibenden Flächen mit einer Schmierflüssigkeit, z. B. mit Schmieröl. Die sich reibenden Flächen werden durch die Schmierflüssigkeit völlig getrennt, es bildet sich zwischen ihnen eine Schmierschicht. Der Koeffizient der Gleitreibung wird dadurch sehr viel kleiner. Man bezeichnet diese Art der Reibung auch als flüssige oder schwimmende Reibung im Gegensatz zur trockenen Reibung.
Andererseits können zahlreiche Vorgänge nicht ohne Reibung ablaufen. So kann ein Straßenfahrzeug nur beschleunigt oder gebremst werden, wenn zwischen den Rädern und der Straße Reibungskräfte vorhanden sind. Der maximale Wert der Haftreibung ist die größte Kraft, mit der das Fahrzeug beschleunigt oder gebremst werden kann. Bei größeren Kräften beginnen die Räder zu gleiten. – Die Zugkraft einer Lokomotive ist durch die Haftreibung ihrer Räder begrenzt. Bei gleitenden Rädern ist die Zugkraft stets kleiner als bei haftenden.

Wortliste zum Text

ab/führen A
ab/nutzen (sich)
auf/schütten A
begrenzen A (durch A)
bohren A
die Bremse, –n
bremsen A

einen Einfluß haben auf A
das Fahrzeug, –e
fräsen A
das Getreide, o.
gleiten
glitt, geglitten (sein)
haften (an, auf D)

die Hangabtriebskraft, ¨-e
der Haufen, –
das Holz
das Kugellager, –
kühlen A
das Lager, – (masch.)
die Normalkraft, ¨-e
der Quader, –
das Rad, ¨-er
das Rollenlager, –
zur Ruhe kommen
der Sand, o.

schmieren A
schütten A
schwimmen
schwamm, geschwommen (sein)
der Tangens, –
übersteigen A
überstieg, überstiegen
unerwünscht
die Vorrichtung, -en
die Zugkraft, ¨-e
die Zugmaschine, -n
der Zylinder, –

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum ist eine geradlinige gleichförmige Bewegung in der Praxis nur unter der Wirkung einer Kraft möglich?
2) Was versteht man unter einer Reibungskraft?
3) Welche Arten der Reibung unterscheidet man?
4) Aus welcher Kraft werden die verschiedenen Reibungskräfte berechnet?
5) Was versteht man unter dem Reibungswinkel?
6) Was ist ein Schüttwinkel?
7) Wodurch unterscheidet sich der Rollreibungskoeffizient von den anderen Reibungszahlen?
8) Welche Bedeutung hat der Rollradius für die Rollreibung?
9) Welche Reibungskräfte sind im Fahrwiderstand enthalten?
10) Unter welcher Bedingung hängt der Gleitreibungskoeffizient nicht von der Geschwindigkeit ab?

2. Übungen zum Text

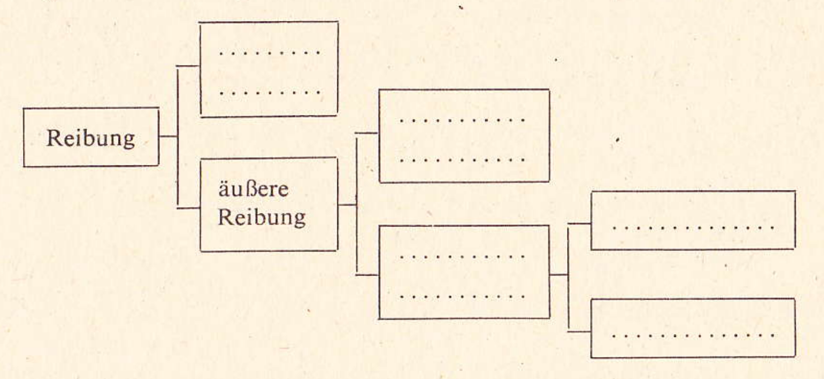
2.1. Reibungsarten

2.1.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Die .... ist eine Reibung der Ruhe. Sie kann nur bis zu einem Maximalwert .... Wenn zwei bewegte Körper aufeinander gleiten, tritt .... auf. Sie wirkt .... zur Bewegungsrichtung. Die .... ist vom Radius des rollenden Körpers abhängig. Alle bewegungshemmenden Kräfte faßt man oft zum .... zusammen.

zunehmen
Haftreibung
entgegengesetzt
Fahrwiderstand
Gleitreibung
Rollreibung

2.1.2. *Ergänzen Sie* das folgende Schema!



2.1.3. *Unterscheiden Sie:*

(1) innere und äußere Reibung,
(2) Haft-, Gleit- und Rollreibung,
(3) Reibung der Ruhe und Reibung der Bewegung!

2.2. Mathematische Beschreibung der äußeren Reibung

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $F_H \leq \mu_0 \cdot F_N$

(2) $\mu_0 = \tan \alpha_R$

(3) $F_G = \mu \cdot F_N$

(4) $F_{RR} = \mu_R \cdot \frac{F_N}{r}$

(5) $F_{RF} = \mu_F \cdot F_N$

2.3. Reibungskoeffizienten

2.3.1. *Nennen* und *charakterisieren Sie* die verschiedenen Koeffizienten der äußeren Reibung!

2.3.2. *Leiten Sie* den Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten μ_0 und dem Reibungswinkel *her*!

2.4. Haft-, Gleit- und Rollreibung

Charakterisieren Sie Haft-, Gleit- und Rollreibung!
Beachten Sie dazu die folgenden Hinweise!

(1) Beschreibung der einzelnen Arten der Reibung
(2) Mathematische Darstellung
(3) Vergleich bezüglich ihrer Größen

2.5. Bedeutung der Reibung

2.5.1. *Nennen* und *beschreiben Sie* Beispiele aus der Praxis, bei denen die Reibung unerwünscht ist!

2.5.2. *Nennen* und *beschreiben Sie* Vorgänge, die ohne Reibung nicht ablaufen können!

2.5.3. *Nennen Sie* Möglichkeiten zur Verringerung der Reibung!

3. Übungen zum Thema

3.1. Reibungswinkel

Mit dem Reibungswinkel α_R ist ein Kegel bestimmt, in dessen Spitze der Angriffspunkt einer Kraft liegt. F' ist die Gegenkraft zu F; F_N' ist die Gegenkraft zu F_N (vgl. Abb. 35.5.).

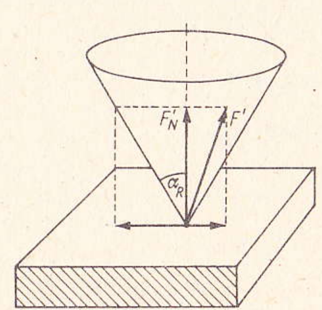


Abb. 35.5.

Begründen Sie, warum eine beliebig große Kraft, deren Wirkungslinie innerhalb des Reibungskegels liegt, keine Bewegung des Körpers hervorruft!

3.2. Experiment zur Bestimmung des Schwerpunktes

Den Schwerpunkt eines Stabes kann man leicht finden, indem man den Stab auf beide Hände auflegt und die Hände langsam gegeneinander bewegt, bis sie sich im Schwerpunkt treffen.
Erklären Sie das Experiment!

3.3. Beispiele aus der Praxis

Begründen Sie folgende Aussagen!

(1) Der Bremsweg eines Fahrzeuges mit blockierten Rädern ist länger als mit rollenden Rädern.
(2) Die Höhe eines aufgeschütteten Haufens hat auf den sich einstellenden Schüttwinkel keinen Einfluß.
(3) Die Zugkraft einer Lokomotive ist durch die Haftreibung ihrer Räder begrenzt.

4. Textaufgaben

203. Welche waagerecht gerichtete Zugkraft F ist erforderlich, um einen Körper mit dem Gewicht G auf einer geneigten Ebene aufwärts zu ziehen? Der Steigungswinkel sei α und die Reibungszahl μ_0 (vgl. Abb. 35.6.).

204. Eine Kiste mit der Breite $b = 2$ m wird durch horizontalen Zug abgeschleppt. In welcher Höhe h darf das Seil höchstens angebracht werden, damit die Kiste nicht kippt?
Der Schwerpunkt S sei in der Mitte; $\mu_0 = 0{,}6$ (vgl. Abb. 35.7.).

205. Kisten, die auf eine geneigte Bahn gelegt werden, sollen von selbst nach unten gleiten. Welche Höhe h dürfen sie bei gegebener Breite b höchstens haben, damit sie sich dabei nicht überschlagen ($\mu_0 = 0{,}7$) (vgl. Abb. 35.8.)?

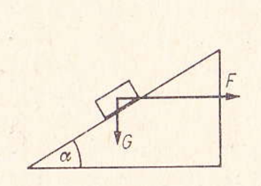


Abb. 35.6.

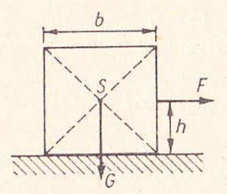


Abb. 35.7.

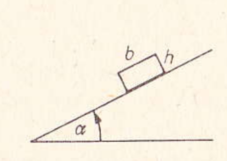


Abb. 35.8.

206. Ein Körper der Masse 100 kg soll mit 5 m/s² beschleunigt werden. Wie groß ist die erforderliche Kraft
1. bei Bewegung auf horizontaler Unterlage und Beachtung der Reibung ($\mu = 0{,}2$),
2. bei Bewegung auf einer geneigten Ebene aufwärts ($\mu = 0{,}2$; Neigungswinkel 30°)?

207. Welche Kraft F ist am Bremshebel einer einfachen Backenbremse erforderlich, wenn die Bremskraft F_B, die Reibungszahl μ und die Hebellängen entsprechend der Abbildung gegeben sind (vgl. Abb. 35.9.).
1. bei Rechtsdrehung und 2. bei Linksdrehung der Bremsscheibe?

208. Bei welchem Öffnungswinkel α rutschen die Füße einer Stehleiter, die oben belastet aber ungesichert ist, auseinander? Die Reibungszahl am Boden

wird mit $\mu_0 = 0{,}3$ angenommen. Das Eigengewicht der Leiter soll unberücksichtigt bleiben (vgl. Abb. 35.10.)!

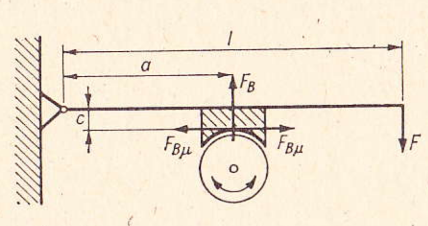


Abb. 35.9.

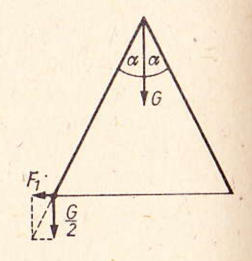


Abb. 35.10.

36. Die elastische Verformung fester Körper

36.1. Verformung und elastische Kräfte

Im Text 22. wurden Kräfte als Ursache der Änderung des Bewegungszustandes und der Formänderung von Körpern definiert. Im folgenden betrachten wir Formänderungen fester Körper etwas genauer.
Jeder feste Körper befindet sich, entsprechend den äußeren Bedingungen, in einem inneren Gleichgewichtszustand. Seine Moleküle bzw. Atome haben dabei bestimmte Abstände voneinander und schwingen um eine Gleichgewichtslage. Ändern sich die äußeren Bedingungen, wirken z. B. Kräfte auf den Körper, so ändert sich auch sein innerer Gleichgewichtszustand. Der Körper wird durch die Kräfte deformiert. Die Deformation bedeutet eine Änderung der Lage der Atome und Moleküle des Körpers zueinander. Es entsteht dabei ein neuer Gleichgewichtszustand, in dem die zwischenmolekularen Kräfte die äußeren Kräfte gerade aufheben. Im deformierten Körper treten elastische Kräfte auf, die mit den äußeren Kräften im statischen Gleichgewicht stehen. Bei einer elastischen Deformation verschwindet die Formänderung vollständig, wenn die äußeren Kräfte nicht mehr wirken. Nichtelastische Deformationen nennt man plastisch.
Zur quantitativen Beschreibung der elastischen Deformation werden neue physikalische Größen eingeführt.

36.2. Spannung, relative Verformung, Hookesches Gesetz

Bei der quantitativen Beschreibung elastischer Verformungen beschränken wir uns auf Körper, bei denen man eine bestimmte Länge und eine über die ganze Länge konstante Querschnittsfläche feststellen kann, wie z. B. bei einem Stab oder

einem Draht. Für Körper mit anderen Formen werden die Untersuchungen sehr kompliziert.
In einem solchen Körper wirkt die Kraft F senkrecht zur Querschnittsfläche A. Ihre Wirkung verteilt sich auf die Querschnittsfläche. Man definiert deshalb die (mechanische) Spannung:

Spannung	$\sigma = \frac{F}{A}$	$[\sigma] = 1\ \mathrm{N\,m^{-2}} = 1\ \mathrm{Pa}$

Die Kraft F bewirkt an diesem Körper eine Längenänderung Δx. Sie wird in Beziehung zur Gesamtlänge x des Körpers betrachtet. Man definiert weiter:

relative Deformation	$\frac{\Delta x}{x}$

(vgl. Abb. 36.1.).

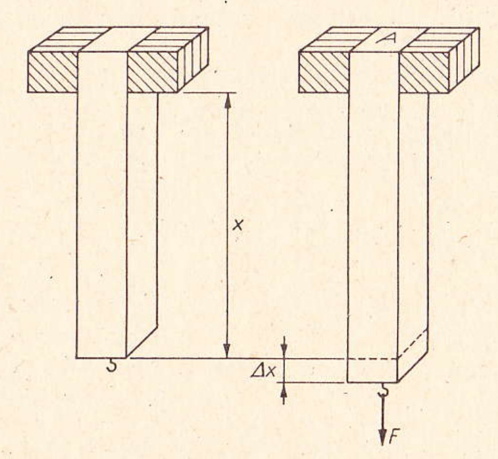


Abb. 36.1. Längenänderung eines Stabes

Falls die Spannung und damit die relative Deformation nicht zu groß sind, gilt das *Hooke*sche Gesetz:

*Hooke*sches Gesetz	$\sigma \sim \frac{\Delta x}{x}$

Die relative Deformation ist direkt proportional zur Spannung.

Bei anderer Wirkungsrichtung kann die Kraft F andere Deformationen hervorrufen. Einige solche Formänderungen werden im folgenden betrachtet.

36.3. Dehnung und Stauchung

Die in Abb. 36.1. dargestellte Deformation ist eine Dehnung, bei entgegengesetzter Kraftrichtung kommt es zu einer Stauchung. Δx ist dabei eine Verlängerung bzw. eine Verkürzung des Körpers. Das Hookesche Gesetz gilt in der Form:

$$\sigma = E \frac{\Delta x}{x}$$

E ist der Elastizitätsmodul des Materials des Körpers. Es gilt:

Elastizitätsmodul	$E = \frac{\sigma x}{\Delta x}$	$[E] = 1\ \mathrm{N\,m^{-2}} = 1\ \mathrm{Pa}$

Die größte Spannung, für die dieses Gesetz noch gilt, heißt die Elastizitätsgrenze des Materials. Die Tab. 36.1. gibt einige Beispiele des Elastizitätsmoduls.

Tabelle 36.1. Elastizitätsmodul verschiedener Stoffe

Material	Elastizitätsmodul in $10^9\ \mathrm{N/m^2}$
Aluminium	≈ 70
Blei	≈ 16
Baustahl	≈ 200
Kupfer	≈ 125

Lehrbeispiel:

Welche elastische Längenänderung wird durch eine Kraft von 50 N an einem 2 m langen Stahldraht von 0,5 mm² Querschnittsfläche hervorgerufen?

S_1 gegeben:

$F = 50\ \mathrm{N}$

$x = 2\ \mathrm{m}$

$A = 0{,}5\ \mathrm{mm^2} = 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2}$

$E = 200 \cdot 10^9\ \mathrm{N\,m^{-2}}$ (Tabelle)

gesucht:

Längenänderung Δx

S_2 Für die Spannung gilt

$\sigma = F/A = E\Delta x/x$

S_3 $$\Delta x = \frac{F \cdot x}{E \cdot A} = \frac{50\ \mathrm{N} \cdot 2\ \mathrm{m}}{200 \cdot 10^9\ \mathrm{N\,m^{-2}} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2}} = 10^{-3}\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{mm}$$

Der Draht wird 1 mm gedehnt.

36.4. Biegung

In der Technik, besonders im Bauwesen, spielt die Belastung von Balken und Trägern durch Biegung eine wichtige Rolle. Als Beispiel soll die Biegung eines einseitig eingespannten Balkens betrachtet werden (vgl. Abb. 36.2.). Wenn auf das freie Ende des Balkens der Länge l die Kraft F wirkt, so biegt sich der Balken um die Strecke h, die als Biegung bezeichnet wird. Denkt man sich den Balken in horizontale Schichten zerlegt, so erkennt man, daß sie unterschiedlich deformiert werden. Die Schichten, die im unteren Teil des Balkens liegen, werden gestaucht, während die Schichten im oberen Teil des Balkens gedehnt werden. In der Mitte des Balkens liegt eine Schicht, die ihre Länge beibehält, sie heißt neutrale Faser.

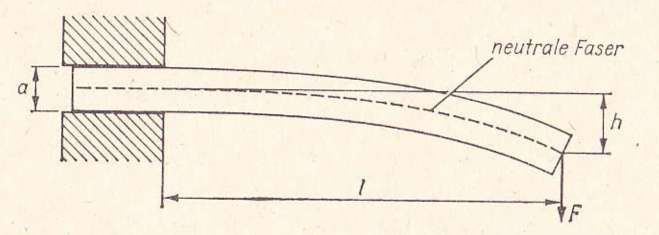


Abb. 36.2. Biegung eines einseitig eingespannten Balkens

Die Spannung ist $\sigma = F/ab$ (a Höhe, b Breite des Balkens). Das *Hooke*sche Gesetz gilt hier in der Form

$$\sigma = \frac{F}{ab} = \frac{h \cdot E \cdot a^2}{4l^3}.$$

Daraus folgt die Biegung eines Balkens:

Biegung eines Balkens	$h = \frac{4l^3 F}{Ea^3 b}$

F ist die angreifende Kraft, a die Höhe, b die Breite und l die Länge des Balkens. Aus der Formel kann man erkennen, daß ein quaderförmiger Balken, der flach eingespannt wird, sich bei einer bestimmten Kraft F mehr durchbiegt, als wenn er hochkantig eingespannt wird.
Beim hochkantig eingespannten Balken ist die Höhe größer als die Breite, während beim flach eingespannten Balken die Höhe kleiner als die Breite ist (vgl. Abb. 36.3.).

Der Balken ist durch die Kraft F nicht gleichmäßig belastet. Die Belastung ist an der Einspannstelle am größten. Tatsächlich bricht der Balken bei zu großer Kraft an dieser Stelle.

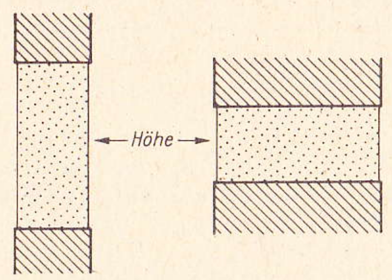


Abb. 36.3. Schnitt durch einen eingespannten Balken (links, hochkantig, rechts, flach)

36.5. Scherung

Ein Quader sei mit einer seiner Flächen befestigt, im Mittelpunkt der dazu parallelen Fläche wirke auf ihn die Kraft F parallel zu einer Seite dieser Fläche (vgl. Abb. 36.4.).

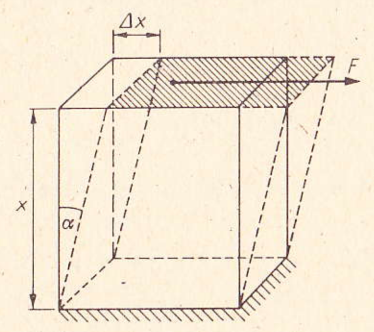


Abb. 36.4. Scherung eines Quaders

Die dadurch hervorgerufene Deformation wird als Scherung bezeichnet. Durch die Schubkraft F werden die zur Grundfläche parallelen Schichten des Quaders parallel zueinander verschoben.
Für kleine Scherungswinkel α gilt

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\Delta x}{x} = \text{relative Scherung.}$$

Die Spannung ist in diesem Falle

$$\sigma = \frac{\text{Schubkraft}}{\text{Grundfläche}}.$$

Für kleine Spannungen gilt die Gleichung

$$\sigma = G \frac{\Delta x}{x}$$

so daß auch hier die relative Deformation direkt proportional zur Spannung ist. G ist der Schubmodul oder Scherungsmodul des untersuchten Materials, der eng mit dem Elastizitätsmodul zusammenhängt.

36.6. Torsion

Ein oben eingespannter zylindrischer Stab der Länge l mit dem Durchmesser $2r$ wird nach der Abb. 36.5. durch ein am unteren Ende wirkendes Kräftepaar verdreht. Der Stab erhält eine Verdrehung (Torsion). Das Torsionsmoment $M = 2Fr$ des Kräftepaares verdreht die untere Querschnittsfläche des Stabes um den Winkel φ gegen die obere.

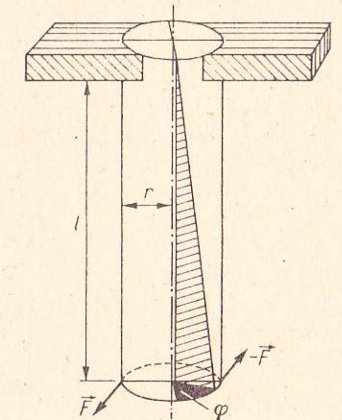


Abb. 36.5. Torsion eines Stabes

Die relative Torsion ist φ/l, die Spannung $\sigma = M/\pi r^2$. Es gilt

$$\text{relative Torsion} = \frac{2}{Gr^2} \cdot \sigma$$

$$\varphi = \frac{2l}{\pi G r^4} M.$$

Der Schubmodul G wird hier als Torsionsmodul bezeichnet.
Aus der Gleichung erkennt man, daß der Radius einen sehr großen Einfluß auf den Drehwinkel hat. Für ein Rohr (Hohlquerschnitt) gleicher Querschnittsfläche

und Länge wie ein Rundstab (Vollquerschnitt) erfordert eine bestimmte Verdrehung ein größeres Torsionsmoment M, d. h., Hohlquerschnitte sind wesentlich torsionsfester als Vollquerschnitte gleicher Querschnittsfläche.

36.7. Elastische Energie

Jede Deformation eines festen Körpers ist mit der Wirkung einer Kraft oder eines Kräftepaares verbunden, die die kleinen Bausteine des Körpers verschieben. Dabei wird eine mechanische Arbeit am Körper verrichtet. War die Deformation elastisch, so wird die am Körper verrichtete Arbeit wieder abgegeben, sobald die Kräfte, die die Deformation hervorrufen, nicht mehr wirken. Man kann also durch eine elastische Deformation von festen Körpern mechanische Energie speichern und einem elastisch deformierten Körper eine potentielle elastische Energie zuordnen.
Die im Text 26. genannte Dehnungsarbeit für eine Feder wird als elastische Energie in der gespannten Feder gespeichert.

36.8. Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Ein Metalldraht soll bei einem Versuch allmählich immer stärker gedehnt werden. Mißt man die dabei auftretende Spannung und die relative Längenänderung und stellt die gemessenen Größen in einem Diagramm dar, so erhält man ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm (vgl. Abb. 36.6.).
Das Hookesche Gesetz gilt nur für kleine Verformungen. Sein Gültigkeitsbereich, d. h. der Bereich der direkten Proportionalität zwischen der Spannung und der relativen Längenänderung, geht bis zum Punkt A. Die bei A wirkende Spannung ist die Proportionalitätsgrenze des untersuchten Materials. Nimmt die wirkende Kraft darüber hinaus zu, so nimmt die Dehnung relativ stärker zu bis zum Punkt A', der die Elastizitätsgrenze bestimmt. Sie ist die maximale Spannung, bei der der

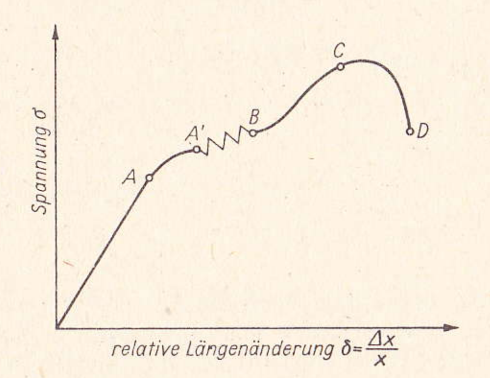


Abb. 36.6.
Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Körper seine ursprünglichen Abmessungen wieder annimmt, wenn die Kraft verschwindet.
Zwischen A' und B liegt das Gebiet des plastischen Fließens. Das Material nimmt bei einer entsprechenden Kraftwirkung die Endlänge nicht sofort an, sondern verlängert sich bei konstanter Kraft noch weiter. Wirkt die Kraft nicht mehr, so bleibt die Verlängerung erhalten. B ist die Fließgrenze. Das plastische Fließen ist für die Kaltbearbeitung von Metallen sehr wichtig. Ohne dieses Verhalten der Metalle wäre das Kaltwalzen von Bandstahl unmöglich.
Wird die Kraft weiter erhöht, so wird das Material weiter gedehnt und dabei zerstört, der Draht reißt schließlich. Der Punkt C kennzeichnet die Festigkeit gegen Zerreißen. Die Spannung an der Stelle C heißt deshalb Zerreißfestigkeit oder Bruchgrenze. Bei Aluminium liegt die Zerreißfestigkeit etwa bei $300 \cdot 10^6$ Pa, sie wird aber stark beeinflußt von Materialfehlern im Draht, z. B. von vorhandenen Kerben in seiner Oberfläche.

Wortliste zum Text

der Balken, –
der Bandstahl, ⸚e
der Baustein, –e
belasten A (durch A)
biegen A
bog, gebogen
die Deformation, –en
deformieren A
ein/spannen A
die Elastizität, o.
die Faser, –n
hochkantig
das Kaltwalzen, o.
die Kerbe, –n
massiv
der Modul, –n
plastisch
reißen
riß, gerissen (sein)
die Scherung
die Schubkraft, ⸚e
stauchen A
die Torsion
torsionsfest
der Träger, –
verdrehen A
verdrillen A
verformen A
verkürzen (sich) A
zerreißen A
zerriß, zerrissen
die Zerreißfestigkeit

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welche Kraftwirkungen unterscheidet man?
2) Welche mikrophysikalische Wirkung hat eine Kraft auf einen Körper?
3) Welche Größen verwendet man zur Beschreibung der elastischen Deformation fester Körper?

4) Wie lautet das *Hooke*sche Gesetz, und unter welcher Bedingung gilt es?
5) Was versteht man in der Mechanik unter Spannung?
6) Wodurch unterscheiden sich Dehnung und Stauchung?
7) Bei welcher Verformung wird der Elastizitätsmodul definiert?
8) Was versteht man unter Elastizitätsgrenze?
9) Was versteht man unter neutraler Faser?
10) Wodurch wird ein Stab verdreht?
11) Warum ist für eine gegebene Materialquerschnittsfläche ein Hohlkörper vorteilhafter als ein massiver Körper?
12) Wodurch erhält ein Körper elastische Energie?
13) Was wird durch die Punkte A, A', B und C im Spannungs-Dehnungs-Diagramm gekennzeichnet?
14) Welche praktische Bedeutung hat die plastische Verformung?

2. Übungen zum Text

2.1. Spannung

Beschreiben Sie den Einfluß von Spannungen in einem festen Körper auf den Gleichgewichtszustand der Teilchen des Körpers!

2.2. Mathematische Beschreibung der elastischen Verformung

2.2.1. *Interpretieren Sie* diese Formel!

Für die Biegung eines einseitig eingespannten Balkens gilt:

$$h = \frac{4l^3}{Ea^3b} \cdot F!$$

2.2.2. *Interpretieren Sie* diese Formel!

Die Gleichung für den Drehwinkel eines verdrillten Rundstabes ist:

$$\alpha = \frac{2l}{\pi \cdot G \cdot r^4} \cdot M$$

2.2.3. *Interpretieren Sie* die Gleichungen!

(1) $\sigma = \frac{F}{A}$ (2) $\sigma = E \cdot \frac{\Delta x}{x}$ (3) $\sigma = G \cdot \frac{\Delta x}{x}$

2.3. Wichtige Begriffe

2.3.1. *Definieren Sie die Begriffe*

mechanische Spannung, Elastizitätsgrenze, elastische Energie, Proportionalitätsgrenze!

2.3.2. *Unterscheiden Sie* Dehnung und Stauchung!

2.3.3. *Unterscheiden Sie* Zerreißfestigkeit und Fließgrenze!

2.3.4. *Ordnen Sie* die Materialkonstanten Elastizitätsmodul E und Schubmodul G den Begriffen Dehnung, Stauchung, Scherung und Torsion *zu*!

2.4. Festigkeit bei elastischen Verformungen

2.4.1. Für die gezeichneten Profile der Abb. 36.7. gilt:

$A_1 = A_2 = A_3$.

Begründen Sie die verschiedenen Biegefestigkeiten der drei Profile!

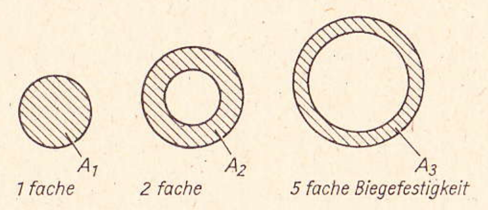


Abb. 36.7.

2.4.2. *Beantworten Sie* folgende Frage, und *begründen Sie* die Antwort!
Unter welcher Voraussetzung ist bei gleicher Querschnittsfläche ein Balken mit rechteckigem Querschnitt stärker belastbar als einer mit quadratischem Querschnitt?

2.4.3. *Begründen Sie,* warum Hohlquerschnitte wesentlich torsionsfester als Vollquerschnitte gleicher Fläche sind!

2.5. Biegung

Beantworten Sie folgende Fragen!

(1) Wie werden die verschiedenen Schichten des Balkens in Abb. 36.2. deformiert?
(2) Warum bleibt die Länge der neutralen Faser konstant?

3. Übungen zum Thema

3.1. Experiment zum Hookeschen Gesetz

Beschreiben Sie ein Experiment zur Gewinnung des *Hooke*schen Gesetzes für die Dehnung eines Stabes!
Geben Sie den Gültigkeitsbereich des Gesetzes an!

3.2. Herleitung von Gleichungen

3.2.1. *Leiten Sie* die Formel für den Scherungswinkel α *her*!
Bei einem Würfel trete infolge einer Schubkraft eine Scherung ein.

3.2.2. *Leiten Sie* die Formel für das Torsionsdrehmoment eines Rundstabes *her*!

3.2.3. *Erklären Sie*, wie man die elastische Energie eines gedehnten Stabes berechnen kann!
Informieren Sie sich dazu in einem Lehrbuch der Physik!

4. Textaufgaben

209. Ein Stahldraht von 1 mm Durchmesser und 5 m Länge wird durch Anhängen eines Gewichtes von $G = 9{,}81$ N um 0,32 mm gedehnt.
Berechnen Sie den Elastizitätsmodul des Materials!

210. Aus einer vertikalen Wand ragt ein quaderförmiger Stab 15 cm heraus. Das Verhältnis von Höhe zu Breite ist 3 : 1, die Breite 5 mm. Am freien Ende des Stabes wirkt eine Last von 245 N. Wie groß ist die Durchbiegung des Stabes? ($E = 1{,}96 \cdot 10^5$ N/mm^{-2})

211. Der lineare Ausdehnungskoeffizient von Stahl beträgt $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}, der Elastizitätsmodul $E = 1{,}96 \cdot 10^5$ N/mm^2. Welcher Druck (Spannung) muß an den Enden eines Stahlzylinders wirken, wenn bei einer Temperaturerhöhung von $\Delta\vartheta = 100$ K die Länge unverändert bleiben soll?

212. Über eine volle Welle aus Stahl soll bei 1 200 Umdrehungen in der Minute eine Leistung von 1 kW übertragen werden. Der Durchmesser der Welle beträgt 4 cm, ihre Länge 2 m. Um welchen Winkel werden dabei die Endflächen der Welle gegeneinander verdreht?
(Torsionsmodul $G = 8{,}14 \cdot 10^4$ N/mm^2)

213. Ein Rundstab mit dem Radius $r = 5$ mm und der Länge $l = 1$ m ist an seinem oberen Ende befestigt und zeigt senkrecht nach unten. Am unteren Ende ist eine Scheibe vom Radius $R = 50$ mm koaxial befestigt. An der Scheibe greift ein Kräftepaar an, das den Rundstab verdrillt. Wie groß ist der Verdrillwinkel, wenn $F = 49{,}03$ N und $G = 7{,}85 \cdot 10^4$ N/mm^2 betragen (vgl. Abb. 36.8.)?

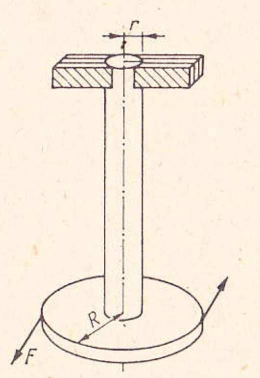


Abb. 36.8.

37. Statik der Flüssigkeiten und Gase

In der Statik der Flüssigkeiten und Gase werden die Bedingungen für das statische Gleichgewicht von Flüssigkeiten und Gasen unter Einwirkung von inneren und äußeren Kräften untersucht. Solche Gleichgewichtsbedingungen sind für die verschiedensten Gebiete der Technik von Bedeutung. Sie müssen z. B. bei der Berechnung von Talsperren und Rohrleitungen, beim Bau von Schiffen, aber auch bei Konstruktion von hydraulischen und pneumatischen Systemen zur Kraftübertragung beachtet werden.
Die Statik der Flüssigkeiten wird auch als Hydrostatik bezeichnet, die Statik der Gase als Aerostatik.
Wesentliche Unterschiede zwischen den Gesetzen der Hydrostatik und der Aerostatik entstehen dadurch, daß Gase leicht komprimiert werden können (vgl. Text 3. und Text 4.), während Flüssigkeiten fast inkompressibel sind. Die Gesetze der Hydrostatik gelten jedoch auch in der Aerostatik, und zwar unter der Voraussetzung, daß die auftretenden Höhenunterschiede im Gas so klein sind, daß man die Dichte des Gases als Konstante betrachten kann (vgl. 37.1.3. mit 37.2.2.).

37.1. Hydrostatik

37.1.1. Grundeigenschaften von Flüssigkeiten

Für das Verständnis der Gesetzmäßigkeiten der ruhenden Flüssigkeiten sind Kenntnisse über die Form- und Volumenänderung der Flüssigkeiten eine wesentliche Voraussetzung. Im Gegensatz zu den festen Körpern können die Flüssigkeiten ihre Form leicht ändern. Das liegt daran, daß die Atome bzw. Moleküle einer Flüssigkeit leicht gegeneinander verschoben werden können, weil die innere Reibung von Flüssigkeiten klein ist. Deshalb kann eine Flüssigkeit fließen, wobei sie die Form des Gefäßes annimmt, in dem sie sich befindet. Sie bildet dabei eine Oberfläche, die in jedem Punkt senkrecht zur Resultierenden der dort wirkenden Kräfte steht.
Die Volumenänderung von Flüssigkeiten unter dem Einfluß von Kräften ist so gering, daß wir sie für unsere Zwecke vernachlässigen dürfen. Das heißt, daß wir eine Flüssigkeit als inkompressibel betrachten und annehmen, daß sie in jedem Punkt dieselbe Dichte hat. Auch die innere Reibung der Flüssigkeiten wird hier nicht berücksichtigt. Unter ‚Flüssigkeit' verstehen wir also im folgenden stets eine Modellflüssigkeit, die inkompressibel ist und keine innere Reibung besitzt.

37.1.2. Der Druck und das Grundgesetz der Hydrostatik

Das Grundgesetz der Hydrostatik macht eine Aussage über den Druck in einer ruhenden Flüssigkeit. Dazu muß zuerst der Druck definiert werden. Zu diesem Zweck betrachtet man ein Gefäß, das mit einer Flüssigkeit gefüllt und durch einen idealen Kolben* abgeschlossen ist (vgl. Abb. 37.1.). Senkrecht auf diesen Kolben mit der Fläche A wirke die Druckkraft F. Dadurch wirkt auf die Flüssigkeit der Druck p:

$\text{Druck} = \dfrac{\text{Druckkraft}}{\text{Fläche}}$	$p = \dfrac{F}{A}$	$[p] = 1\ \text{N m}^{-2} = 1\ \text{Pa}$

▶ 1 Pa (Pascal) ist der Druck, der durch eine Kraft von 1 N erzeugt wird, die gleichmäßig auf eine Fläche von 1 m² wirkt.

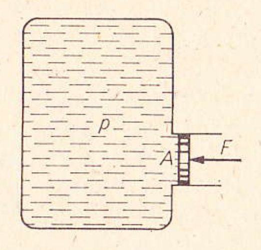


Abb. 37.1. Zur Erklärung des Druckes

Zur Herleitung des Grundgesetzes der Hydrostatik betrachtet man nun ein mit einer Flüssigkeit gefülltes Gefäß, das durch zwei ideale Kolben mit den Querschnittsflächen A_1 und A_2 abgeschlossen ist (vgl. Abb. 37.2.). Auf die Kolben wirken die Kräfte F_1 und F_2. Dabei soll sich das System im statischen Gleichgewicht befinden, so daß sich die Kolben nicht bewegen.

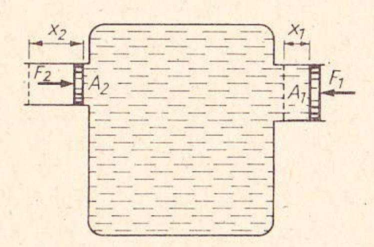


Abb. 37.2. Zur Herleitung des Grundgesetzes der Hydrostatik

* Ein idealer Kolben schließt genau ab, bewegt sich ohne Reibung und hat keine Masse.

Wenn man die Kraft F_1 um einen (beliebig) kleinen Betrag vergrößert, so werden die Kolben um die Strecken x_1 bzw. x_2 verschoben. Auf Grund der Inkompressibilität sind die dabei bewegten Volumina der Flüssigkeit gleich:

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 x_1 = A_2 x_2$$

Außerdem müssen auf Grund des Energiesatzes die verrichteten Arbeiten gleich sein:

$$W_1 = W_2$$

$$F_1 x_1 = F_2 x_2$$

Durch Division dieser Gleichungen folgt

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$p_1 = p_2$$

Allgemein gilt das

Grundgesetz der Hydrostatik	$p_1 = p_2 = \ldots = p_n$

▶ Bei Vernachlässigung des Gewichtes ist der Druck in einer Flüssigkeit überall gleich groß.

37.1.3. Der Schweredruck in Flüssigkeiten

Während bisher das Gewicht der Flüssigkeit vernachlässigt wurde, soll jetzt seine Wirkung untersucht werden. Ein zylindrisches Gefäß sei mit einer Flüssigkeit gefüllt. A sei die Querschnittsfläche des Gefäßes, h die Höhe der Flüssigkeitssäule* und ϱ die Dichte der Flüssigkeit (vgl. Abb. 37.3.).
Dann ist $V = Ah$ das Volumen der Flüssigkeit, $m = \varrho Ah$ ihre Masse und $G = \varrho g Ah$ ihr Gewicht. Das Gewicht wirkt als Kraft auf den Boden des Gefäßes

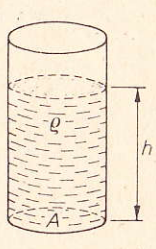


Abb. 37.3. Zum Schweredruck in Flüssigkeiten

* Genau betrachtet ist h die Tiefe. Das ist wichtig für den Vergleich mit 37.2.2.

und erzeugt dort einen Druck, den man als Schweredruck bezeichnet, weil er durch das Gewicht der Flüssigkeit hervorgerufen wird:

Schweredruck	$p = \frac{G}{A} = \varrho g h$

Aus der Gleichung folgt, daß der Schweredruck in einer Flüssigkeit für konstantes g nur von der Dichte und von der Höhe der Flüssigkeitssäule abhängt. Die Abhängigkeit ist linear und wird von der Form des Gefäßes nicht beeinflußt. So ist der Schweredruck in den drei Gefäßen der Abb. 37.4. gleich groß. Diese Tatsache wird als hydrostatisches Paradoxon bezeichnet, weil wir es zunächst paradox finden könnten, daß der Druck in diesen Behältern nicht vom Gesamtgewicht der Flüssigkeit abhängt.

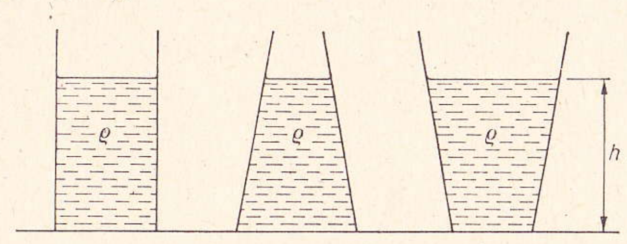


Abb. 37.4. Zum hydrostatischen Paradoxon

Die Gleichung für den Schweredruck gilt nicht nur für den Boden des Gefäßes, sondern für einen beliebigen Punkt in der Flüssigkeit, wobei h die Entfernung dieses Punktes von der Flüssigkeitsoberfläche ist (vgl. Fußnote auf S. 349).
Da der Schweredruck bei gegebener Fallbeschleunigung und Dichte nur von der Höhe abhängt, gilt das Gesetz der verbundenen Gefäße (vgl. Abb. 37.5.). Danach steht eine Flüssigkeit in verschiedenen zusammenhängenden Gefäßen stets in der gleichen Höhe. Ein Höhenunterschied Δh würde zu einem Druckunterschied $\Delta p = \varrho g \Delta h$ führen. Das hätte eine Bewegung der Flüssigkeit zur Folge, bis Δh null wäre.
Durch das Eigengewicht der Flüssigkeit kommt auch die Wirkung des in Abb. 37.6. dargestellten Hebers zustande.

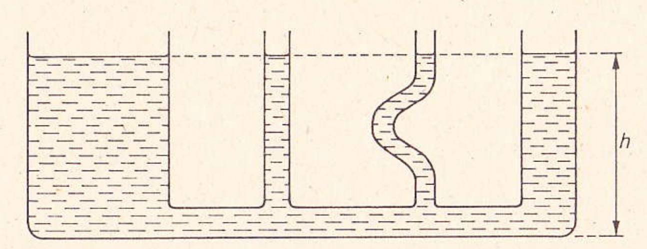


Abb. 37.5. Flüssigkeit in verbundenen Gefäßen

Die Flüssigkeit fließt aus dem Gefäß aus, solange ein Höhenunterschied Δh besteht. Das Rohr muß zu Beginn gefüllt werden. Der Heber zeigt außerdem, daß zwischen den Molekülen der Flüssigkeit relativ große Kohäsionskräfte wirken, da sonst die Flüssigkeitssäule im Rohr reißen würde. Die Kohäsionskräfte dürfen nicht mit den viel kleineren Kräften bei der gegenseitigen Verschiebung der Moleküle verwechselt werden (vgl. 37.1.1.).

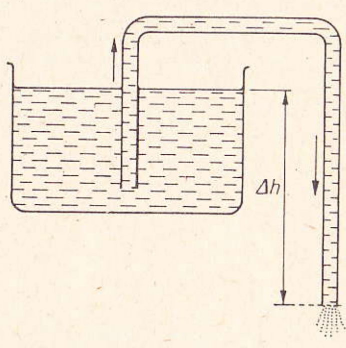


Abb. 37.6. Heber

37.1.4. Der Auftrieb

Ein quaderförmiger Körper der Grundfläche A und der Höhe h sei in eine Flüssigkeit so eingetaucht, daß seine Grundfläche den Abstand h_2 und die obere Fläche den Abstand h_1 von der Flüssigkeitsoberfläche hat (vgl. Abb. 37.7.). Dann wirken

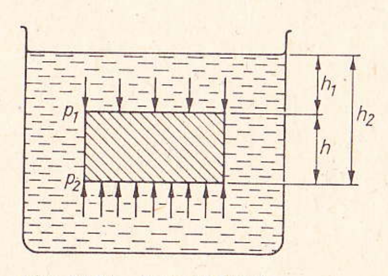


Abb. 37.7. Zum Auftrieb

neben der Schwerkraft auf alle Flächen des festen Körpers Druckkräfte. Die seitlichen Druckkräfte heben sich gegenseitig auf. Auf die obere Fläche des Körpers wirkt die Kraft $p_1 A = \varrho g h_1 A$. Diese Kraft wirkt nach unten. Ihr entgegengerichtet ist eine Kraft $p_2 A = \varrho g h_2 A$, die auf die untere Fläche des Körpers wirkt. Die Resultierende aus diesen beiden Kräften ist eine nach oben gerichtete Kraft F_A, die man als Auftrieb bezeichnet. Es gilt:

Auftrieb	$F_A = \varrho g (h_2 - h_1) A = \varrho g V$

$V = (h_2 - h_1)A$ ist das Volumen des festen Körpers. Demzufolge ist $\varrho g V$ das Gewicht der Flüssigkeit mit dem Volumen V. Diesen Zusammenhang bezeichnet man auch als das Prinzip des *Archimedes* (287–212 v. u. Z.):

▶ Der Auftrieb F_A ist gleich dem Gewicht der vom festen Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Beim Eintauchen eines festen Körpers in eine Flüssigkeit wird deshalb sein Gewicht mg scheinbar um F_A verringert. Wir unterscheiden nun die Dichte ϱ_K des festen Körpers und die Dichte ϱ_F der Flüssigkeit. Dann ist das scheinbare Gewicht des Körpers in der Flüssigkeit:

scheinbares Gewicht	$G' = G - F_A = (\varrho_K - \varrho_F) g V$

37.1.5. Schwimmen, Schweben und Sinken

Mit Hilfe des Begriffes Auftrieb werden die Begriffe Schwimmen, Schweben und Sinken erläutert.
Ist bei einem vollständig eingetauchten Körper das Gewicht des Körpers kleiner als sein Auftrieb, so steigt der Körper, bis sich ein Teil von ihm über der Flüssigkeitsoberfläche befindet. Von diesem Augenblick an wird der Auftrieb kleiner. Der Körper steigt weiter, bis der Auftrieb des Körpers gleich seinem Gewicht ist. Dann schwimmt der Körper.
Sind dagegen bei einem vollständig eingetauchten Körper Gewicht und Auftrieb gleich groß, so befindet er sich an jeder Stelle innerhalb der Flüssigkeit im statischen Gleichgewicht. Der Körper schwebt.
Ist schließlich bei einem vollständig eingetauchten Körper das Gewicht größer als sein Auftrieb, so sinkt der Körper.
Entscheidende Bedeutung für einen schwimmenden Körper, z. B. für ein Schiff, hat die Stabilität beim Schwimmen. Die Lage eines schwimmenden Körpers ist stabil, wenn er bei einer Störung seiner Lage stets von selbst in die ursprüngliche Lage zurückkehrt.

37.2. Aerostatik

37.2.1. Grundeigenschaften von Gasen

Auch im Gas sind Atome bzw. Moleküle leicht gegeneinander verschiebbar. Im Gegensatz zur Flüssigkeit können jedoch die Kohäsionskräfte stets vernachlässigt werden. Gase kann man leicht komprimieren, wobei für eine gegebene Temperatur der Zusammenhang zwischen Volumen und Druck für eine abgeschlossene Menge eines idealen Gases durch das *Boyle*sche Gesetz dargestellt wird (vgl. Text 3.). Die Kompressibilität der Gase darf deshalb im allgemeinen nicht vernachlässigt werden. Das ist besonders für den Schweredruck in Gasen zu beachten.

37.2.2. Der Schweredruck in Gasen

Auch ein Gas erzeugt durch sein Gewicht einen Schweredruck. Die Gleichung, die in 37.1.3. für Flüssigkeiten hergeleitet wurde, gilt hier aber nur, wenn die betrachtete Höhe so gering ist, daß man die Dichte als konstant betrachten darf. Im allgemeinen muß die Dichte aber als variabel angesehen werden. Für konstante Temperaturen gilt das *Boyle*sche Gesetz

$$p_0 V_0 = pV$$

$$\frac{p_0}{V} = \frac{p}{V_0}$$

Nach Multiplikation mit der Masse des Gases haben wir

$$p_0 \varrho = p \varrho_0$$

$$\varrho = f(p) = \frac{\varrho_0 \cdot p}{p_0}; \quad T = \text{konstant}.$$

Die Abhängigkeit des Druckes von der Höhe wird differentiell dargestellt. Statt $p = \varrho g h$ schreiben wir also

$$\mathrm{d}p = -\varrho(p)\, g\, \mathrm{d}h.$$

Die Fallbeschleunigung wird als konstant angesehen. h ist hier im Gegensatz zu 37.1.3. die vom Boden aus gemessene Höhe. Das Minuszeichen drückt aus, daß der Druck mit zunehmender Höhe abnimmt.
Nach Einsetzen für ϱ, Ordnen und Integration haben wir

$$\ln p = -\frac{\varrho_0 g h}{p_0} + C.$$

Am Boden ($h = 0$) wird der Druck mit p_0 bezeichnet. Durch Einsetzen dieser Werte wird die Integrationskonstante C bestimmt:

$$\ln p_0 = 0 + C.$$

Damit ist

$$\ln p - \ln p_0 = \ln \frac{p}{p_0} = \frac{\varrho_0 g h}{p_0}$$ und der Schweredruck:

Schweredruck im Gas in Abhängigkeit von der Höhe	$p = p_0\, \mathrm{e}^{-\varrho_0 g h / p_0}$

ϱ_0 ist nun die Gasdichte am Boden.
Da man mit dieser Gleichung auch den atmosphärischen Luftdruck, d. h. den Meßwert des Barometers in Abhängigkeit von der Höhe berechnen kann, wird sie als barometrische Höhenformel bezeichnet. Sie gilt nur angenähert, da die Voraussetzung der konstanten Temperatur in der Praxis nicht erfüllt ist. Bei 0 °C in Höhe des Meeresspiegels geht man von $p_0 = 101\,325$ Pa und $\varrho_0 = 1{,}293$ kg m^{-3} aus.

37.3. Druckmessung mit Hilfe einer Flüssigkeitssäule

Die Abb. 37.8. zeigt einen Gasraum mit dem Druck p, der auf eine Flüssigkeitssäule der Dichte ϱ in einem U-Rohr wirkt. Am offenen Ende des Rohres wirkt der atmosphärische Luftdruck. Unter dem Einfluß dieser Drücke bilden die beiden Oberflächen der Flüssigkeitssäule den Höhenunterschied Δh, und es gilt

$$p = \varrho g \Delta h + p_0 .$$

Damit hat man den Druck p bestimmt. Als atmosphärischer Luftdruck wird der Normdruck von $1{,}01 \cdot 10^5$ Pa eingesetzt.
Der atmosphärische Luftdruck selbst kann ebenfalls aus der Höhe einer Flüssigkeitssäule bestimmt werden, wie *Torricelli* (1608–1647) gezeigt hat.
Zum *Torricelli*schen Experiment füllt man ein etwa 1 m langes Glasrohr vollständig mit Quecksilber und taucht es mit dem offenen Ende in ein Gefäß mit Quecksilber, wobei nichts ausfließen darf (vgl. Abb. 37.9.). Das Quecksilber bildet

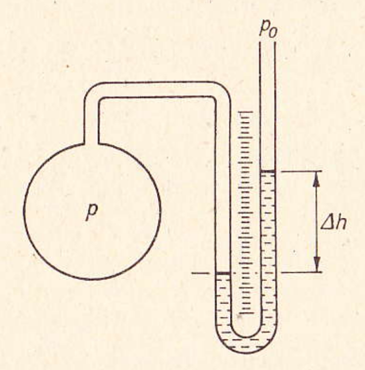


Abb. 37.8. Offenes Manometer

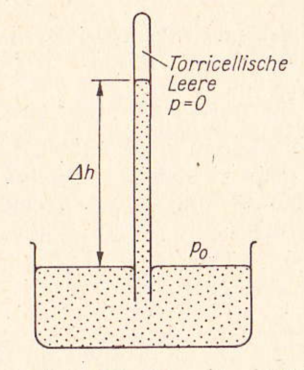


Abb. 37.9. Versuch von *Torricelli*

dann eine Säule von etwa 0,76 m Höhe. Über dem Quecksilber befindet sich im Rohr keine Luft, so daß der Druck null herrscht*. Der Schweredruck der Quecksilbersäule im Rohr steht im Gleichgewicht mit dem atmosphärischen Luftdruck p_0. Die gesamte Anordnung bildet ein Barometer, d. h. ein Gerät zur Bestimmung des atmosphärischen Luftdruckes:

atmosphärischer Luftdruck am Quecksilberbarometer	$p_0 = \varrho_{Hg}\, g\, \Delta h$

Im Gegensatz zum offenen Manometer (vgl. Abb. 37.8.) haben wir hier ein geschlossenes Manometer, bei dem nur auf ein Ende der Flüssigkeitssäule ein Gasdruck wirkt.

* Tatsächlich ist dieser Raum nicht vollständig leer, sondern mit Quecksilberdampf gefüllt, dessen Druck jedoch vernachlässigt werden darf.

Das Experiment von *Torricelli* brachte für das 17. Jh. wichtige Erkenntnisse. Es zeigte, daß man einen (fast) leeren Raum herstellen konnte, was bis dahin für unmöglich gegolten hatte. Außerdem erklärte es, warum eine Saugpumpe für Wasser theoretisch nur bis zu einer Höhe von 10 m arbeiten kann. Eine höhere Wassersäule kann nämlich vom atmosphärischen Luftdruck nicht im Gleichgewicht gehalten werden.

Wortliste zum Text

die Aerostatik, o.
aerostatisch
Archimedes
atmosphärisch
der Auftrieb
aus/fließen (aus D)
floß aus, ausgeflossen (sein)
das Barometer, –
barometrisch
differentiell
ein/tauchen A (in A)
der Heber, –
hydraulisch
die Hydrostatik, o.
hydrostatisch
inkompressibel
der Meeresspiegel, o.
paradox
das Paradoxon, Paradoxa
pneumatisch
saugen A
die Saugpumpe, –n
die Säule, –n
schweben
die Talsperre, –n
die Tiefe, –n
Torricelli, Evangelista

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Welcher wesentliche Unterschied besteht zwischen Gasen und Flüssigkeiten in bezug auf die Statik?
2) Welche Eigenschaften einer realen Flüssigkeit werden i. a. vernachlässigt?
3) Was wird beim Grundgesetz der Hydrostatik vernachlässigt?
4) Was versteht man unter Schweredruck, und wie wird er berechnet?
5) Was versteht man unter dem hydrostatischen Paradoxon?
6) Was sagt das Gesetz der verbundenen Gefäße?
7) Welche Kräfte sind für die Funktion des Hebers von Bedeutung?
8) Wie lautet das Archimedische Prinzip?
9) Wie unterscheiden sich Schweben und Schwimmen bezüglich der Position des Körpers?
10) Welche Größen müssen konstant sein, damit die barometrische Höhenformel exakt gilt?
11) Welcher Unterschied besteht zwischen Barometer und Manometer?
12) Warum kann Wasser höchstens 10 m hoch gesaugt werden?

2. Übungen zum Text

2.1. Grundeigenschaften der Flüssigkeiten und Gase und ihre Anwendung

2.1.1. *Vergleichen Sie* Flüssigkeiten und Gase in bezug auf ihre Grundeigenschaften!

2.1.2. *Beantworten Sie die Fragen!*

(1) Unter welcher Bedingung gelten die Gesetze der Hydrostatik auch für die Aerostatik?
(2) Wodurch unterscheiden sich prinzipiell hydraulische Systeme von pneumatischen Systemen?
(3) Bei welchen technischen Problemen muß man aerostatische bzw. hydrostatische Gesetze beachten?

2.2. Die mathematische Beschreibung der Gesetze der Hydro- und Aerostatik

2.2.1. *Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!*

(1) $p_1 = p_2 = \dots = p_n$ (4) $G' = (\varrho_K - \varrho_F)\, gV$

(2) $p = \varrho gh$ (5) $p = p_0\, e^{-\frac{\varrho_0 gh}{p_0}}$

(3) $F_A = \varrho gV$ (6) $p_0 = \varrho_{Hg}\, g\, \Delta h$

2.2.2. *Vergleichen Sie* Flüssigkeiten und Gase in bezug auf den Schweredruck!

2.3. Der Auftrieb

2.3.1. *Leiten Sie* die Gleichung für den Auftrieb mathematisch *her*! Verwenden Sie dazu eine entsprechende Skizze!

2.3.2. *Vergleichen Sie* Sinken, Schweben, Steigen und Schwimmen bezüglich

(1) der Relation zwischen Auftriebskraft und Gewicht
(2) der resultierenden Kraft, die auf den festen Körper wirkt
(3) der Relation des verdrängten Flüssigkeitsvolumens und des Volumens des festen Körpers!

2.4. Druckmessung

2.4.1. *Ergänzen Sie den Text!*

Mit der .... Höhenformel kann man den .... Luftdruck berechnen. | Barometer, Manometer

Zur Messung des Luftdruckes verwendet man ...., während man zur Druckmessung von Flüssigkeiten undGasen .... benutzt. | atmosphärisch, barometrisch

2.4.2. *Beschreiben Sie* den Versuch von *Torricelli*!

2.4.3. *Beschreiben Sie* Methoden zur Druckmessung mit dem offenen bzw. geschlossenen Manometer!

3. Übungen zum Thema

3.1. Das Gesetz der verbundenen Gefäße und die Dichtebestimmung

3.1.1. *Leiten Sie* aus dem Gesetz über den Schweredruck in Flüssigkeiten das Gesetz über verbundene Gefäße *her*!
Verwenden Sie die Skizze eines U-förmig gebogenen Rohres!

3.1.2. *Leiten Sie* das Verhältnis der zwei Flüssigkeitshöhen in einem U-förmig gebogenen Rohr *her*, wenn sich in dem Rohr zwei nicht mischbare Flüssigkeiten befinden (z. B. H_2O und Hg)!

3.1.3. *Diskutieren Sie* die Möglichkeit der Dichtebestimmung einer Flüssigkeit mit Hilfe eines U-förmig gebogenen Rohres!

3.2. Experimente und Anwendungen der Hydrostatik

3.2.1. *Beschreiben Sie* einen Versuch zum hydrostatischen Paradoxon!

3.2.2. *Erklären Sie* das Prinzip der Wasserversorgung einer Stadt!

3.2.3. *Erklären Sie* die Wirkungsweise der hydraulischen Presse!

3.2.4. *Diskutieren Sie* die Realisierbarkeit des folgenden Versuchs und begründen Sie Ihr Ergebnis!

In einem Brunnen befindet sich in 11 m Tiefe Wasser, das mit Hilfe einer Saugpumpe gefördert werden soll. In welcher Höhe über dem Wasserspiegel ist die Pumpe anzubringen?

3.2.5. *Beschreiben Sie* die Schritte eines Experimentes zur Dichtebestimmung eines festen Körpers auf der Grundlage des Auftriebes!

4. Textaufgaben

214. Berechnen Sie die Höhe h, bei der sich der Luftdruck um die Hälfte verringert hat! In der Höhe $h = 0$ ist für $p_0 = 101\,325$ Pa und für $\varrho_0 = 1{,}293$ kg m^{-3} zu setzen!

215. Bei welchem Flüssigkeitsstand (Füllhöhe) wird der Überdruck am Boden eines mit Azeton ($\varrho = 0{,}79$ g cm^{-3}) gefüllten Gefäßes gleich $1{,}47 \cdot 10^4$ Pa?

216. Wie groß ist der Überdruck am Boden einer Gießform, wenn sie 78 cm hoch mit flüssigem Grauguß ($\varrho = 6{,}9$ g cm^{-3}) gefüllt ist?

217. Um wieviel Meter kann sich die Förderhöhe (Saugleistung) einer Wasserpumpe ändern, wenn die Änderung des Luftdruckes $\pm 5{,}33 \cdot 10^3$ Pa beträgt?

218. *Otto v. Guericke* benutzte für seinen berühmten Versuch zwei Halbkugeln von 57,5 cm Durchmesser. Mit welcher Kraft hielten sie zusammen, wenn ein Luftdruck von $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa angenommen wird?

219. Ein Stück Holz (vgl. Abb. 37.10.) sinkt in Benzin ($\varrho_B = 0{,}7$ g cm^{-3}) um 8 mm tiefer ein als in Wasser.
Welche Dichte hat das Holz?

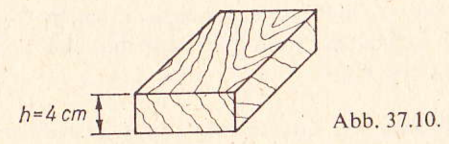


Abb. 37.10.

220. Wieviel Kork ($\varrho_1 = 0{,}24$ g cm^{-3}) ist für eine Schwimmweste notwendig, damit ein Mensch mit einem Gewicht von 686 N ($\varrho_2 = 1{,}1$ g cm^{-3}) so im Wasser schwimmt, daß $^1/_6$ seines Körpervolumens über der Wasseroberfläche ist?

38. Dynamik der Flüssigkeiten und Gase

Die Dynamik der Flüssigkeiten und Gase wird auch als Hydro- und Aerodynamik bezeichnet. Sie untersucht die Gesetze, die für die Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen gelten. Wenn diese Bewegung mit Geschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit erfolgt, so stimmt die Dynamik der Flüssigkeiten mit der der Gase weitgehend überein. Im folgenden sind deshalb nur die Flüssigkeiten Gegenstand der Betrachtung, da deren Bewegungsgesetze unter der genannten Voraussetzung auch auf die Gase anwendbar sind.
Die Bewegung einer Flüssigkeit bezeichnen wir als Strömung.

38.1. Die Beschreibung von Flüssigkeitsströmungen

38.1.1. Strömungsgeschwindigkeit und Stromlinien

Die Strömung einer Flüssigkeit wird quantitativ dadurch beschrieben, daß man zu jedem Zeitpunkt t für jeden Ort mit den Koordinaten x, y, z die nach Betrag und Richtung bestimmte Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v} = \vec{v}(t, x, y, z)$ angibt. Dadurch wird jedem Punkt der Strömung ein Geschwindigkeitspfeil zugeordnet. Die Stromlinien sind diejenigen Kurven, deren Richtung in einem gegebenen Punkt gleich der Richtung der Strömungsgeschwindigkeit in diesem Punkt ist. Damit ergibt sich das Geschwindigkeitsfeld einer Strömung wie in Abb. 38.1.

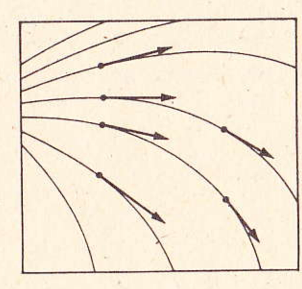


Abb. 38.1. Geschwindigkeitsfeld einer Strömung

In vielen praktischen Fällen ist die Geschwindigkeit $\vec{v}$ zeitunabhängig, so daß sie nur vom Ort in der Flüssigkeit abhängt. Einem gegebenen Punkt in der Flüssigkeit ist dann stets dieselbe Geschwindigkeit $\vec{v} = \vec{v}(x, y, z)$ zuzuordnen. In diesem Falle heißt die Strömung stationär:

▶ Eine Strömung ist stationär, wenn ihr Strömungsfeld zeitlich konstant ist.

In diesem besonderen Falle sind die Stromlinien mit den Bahnkurven identisch, d. h., die Flüssigkeitsteilchen bewegen sich auf den Stromlinien. Der Text beschränkt sich auf stationäre Strömungen.
Als spezielle Beispiele betrachten wir eine Parallelströmung und eine Ausweichströmung (vgl. Abb. 38.2.).

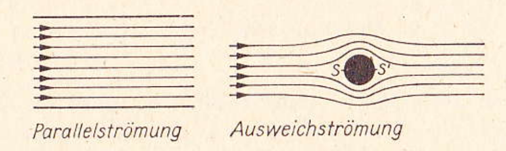


Abb. 38.2. Strömungsfelder

Bei einer Parallelströmung verlaufen alle Stromlinien parallel zueinander. Befindet sich aber in der strömenden Flüssigkeit ein fester Körper, so werden die Stromlinien verdrängt. Bei relativ kleinen Geschwindigkeiten bleiben die Stromlinien geordnet. Diese Strömung nennt man Ausweichströmung. Im Punkt S findet eine Trennung der Stromlinien statt. Die Flüssigkeitsteilchen weichen nach

rechts bzw. links aus. Im Punkt S ruht die Flüssigkeit, sie wird gestaut. S nennt man deshalb Staupunkt. Entsprechendes gilt für S'. Wegen der Relativität der Bewegung erhält man die gleichen Strömungsverhältnisse bei ruhender Flüssigkeit und bewegtem festen Körper.

38.1.2. Stromröhre und Stromfaden

In der Strömung denkt man sich eine (kleine) geschlossene Kurve k (vgl. Abb. 38.3.). Alle Stromlinien, die durch einen Punkt von k gehen, bilden die Wand einer Stromröhre. Die durch die von k begrenzte Fläche A verlaufenden Stromlinien liegen innerhalb der Stromröhre. Die Wand der Stromröhre wird einfach als Stromröhre, das Innere als Stromfaden bezeichnet. Aus dem Gesagten folgt, daß keine Flüssigkeitsteilchen durch die Wand der Stromröhre gehen können. Vielmehr können die durch A eintretenden Teilchen die Stromröhre nur durch eine Fläche A_1 verlassen.

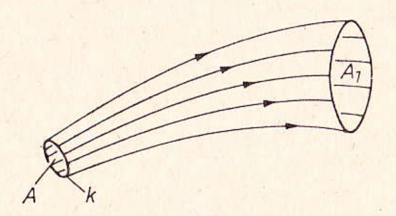


Abb. 38.3. Stromröhre

38.1.3. Stromstärke und Kontinuitätsgleichung

Wir nehmen an, daß durch die Fläche A in Abb. 38.3. in der Zeit t das Flüssigkeitsvolumen V in die Stromröhre eintritt. Damit definiert man:

Stromstärke	$I = \frac{V}{t}$	$[I] = 1\ \mathrm{m^3\,s^{-1}}$

▶ Die Stromstärke ist der Quotient aus dem in die Stromröhre eintretenden Flüssigkeitsvolumen und der dazu benötigten Zeit t*.

Wie in Text 37. wird auch hier vorausgesetzt, daß die Flüssigkeit inkompressibel ist. Außerdem kann innerhalb einer Stromröhre keine Flüssigkeitsmenge entstehen oder verschwinden. Daraus folgt:

▶ Die Stromstärke ist an allen Stellen einer Stromröhre gleich.

* Die allgemeine Definition durch einen Differentialquotienten ist unnötig, da wir nur stationäre Strömungen betrachten.

Aus

$$\frac{V_1}{t} = \frac{V_2}{t}$$

folgt

$$\frac{A_1 s_1}{t} = \frac{A_2 s_2}{t},$$

denn die Flüssigkeitsvolumina V_1 und V_2 bewegen sich in der gleichen Zeit t, und das Volumen ist das Produkt aus Querschnittsfläche A und zurückgelegtem Weg s. Daraus ergibt sich die

Kontinuitätsgleichung	$A_1 v_1 = A_2 v_2$

▶ Das Produkt aus Querschnittsfläche der Stromröhre und zugehöriger Strömungsgeschwindigkeit ist konstant.

Dieser Zusammenhang wird in Abb. 38.4. dargestellt. Dort erkennt man: Je größer der Querschnitt einer Stromröhre ist, desto weiter liegen die Stromlinien auseinander, und desto kleiner ist die Strömungsgeschwindigkeit v.

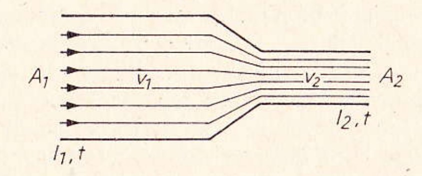


Abb. 38.4. Zur Kontinuitätsgleichung

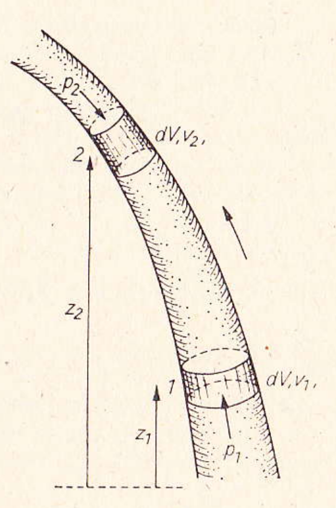


Abb. 38.5. Zur *Bernoulli*schen Gleichung

38.1.4. Die Bernoullische Gleichung

Eine weitere wichtige Gleichung erhält man, wenn man die Energieverhältnisse der Strömung untersucht.

An der Stelle (1) einer Stromröhre wird die Flüssigkeit der Dichte ϱ durch den äußeren Druck p_1 um das Volumen $\mathrm{d}V$ weiterbewegt (vgl. Abb. 38.5.). Dazu ist die mechanische Arbeit $p_1 \cdot \mathrm{d}V$ notwendig. Das Volumenelement $\mathrm{d}V$ enthält die potentielle Energie $\varrho g z_1\,\mathrm{d}V$ und die kinetische Energie $\frac{1}{2}\varrho v_1^2\,\mathrm{d}V$. Infolgedessen bewegt sich die Flüssigkeit auch an der Stelle (2) um $\mathrm{d}V$ weiter, da die Stromstärke

konstant ist. Sie verrichtet dabei die Arbeit $p_2 \cdot dV$. Das Volumenelement hat hier nach der Kontinuitätsgleichung die kinetische Energie $\frac{1}{2}\varrho v_2^2\, dV$ und durch die veränderte Höhe die potentielle Energie $\varrho g z_2\, dV$. Alle übrigen Bedingungen bleiben konstant, da eine stationäre Strömung vorliegt. Falls die innere Reibung (vgl. Text 35.) vernachlässigt wird, gilt deshalb für die mechanische Energie und die verrichtete mechanische Arbeit an den Stellen (1) und (2) der Energiesatz in der Form

$$p_1\, dV + \varrho g z_1\, dV + \tfrac{1}{2}\varrho v_1^2\, dV = p_2\, dV + \varrho g z_2\, dV + \tfrac{1}{2}\varrho v_2^2\, dV.$$

Daraus erhält man leicht:

*Bernoulli*sche Gleichung	$p + \varrho g z + \frac{1}{2}\varrho v^2 = p_0 = \text{konstant.}$

p_0 ist der Gesamtdruck, $\frac{1}{2}\varrho v^2$ der dynamische Druck oder Staudruck und $p + \varrho g z$ der statische Druck. Falls die Stromröhre horizontal liegt, so ändert sich die potentielle Energie nicht. Die *Bernoulli*sche Gleichung vereinfacht sich dann zu

$$p + \tfrac{1}{2}\varrho v^2 = p_0 = \text{konstant.}$$

Betrachtet man noch einmal die Ausweichströmung nach Abb. 38.2., so wird der Zusammenhang zwischen statischem Druck und Staudruck besonders deutlich. In den Punkten S und S' ist die Geschwindigkeit null. Die Gleichung $p_0 = p + \frac{1}{2}\varrho v^2$ zeigt den Zusammenhang. Die Summe aus statischem und dynamischem Druck ist gleich dem Gesamtdruck p_0. Der statische Druck kann höchstens den Wert des Gesamtdruckes p_0 annehmen. Im Staupunkt ist demzufolge der statische Druck maximal.

38.2. Beispiele für Flüssigkeitsströmungen

38.2.1. Ausströmen einer Flüssigkeit

Die Abb. 38.6. zeigt ein Gefäß mit einer Flüssigkeit, die in der Höhe z_2 mit der Geschwindigkeit v_2 ausströmt. Das Gefäß soll so groß sein, daß der Flüssigkeitsspiegel vernachlässigbar sinkt (z_1 = konstant, $v_1 = 0$). Außerdem ist $p_1 = p_2$

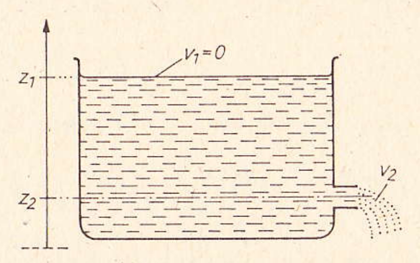


Abb. 38.6. Ausströmen einer Flüssigkeit aus einem Gefäß

(atmosphärischer Luftdruck). Die Anwendung der *Bernoulli*schen Gleichung ergibt

$$\varrho g z_1 = \varrho g z_2 + \tfrac{1}{2}\varrho v_2^2.$$

Daraus folgt

$$v_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}$$

Ein Vergleich mit einer frei fallenden Flüssigkeit ergibt, daß die Ausströmungsgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit einer Flüssigkeit ist, die im Schwerefeld der Erde die Höhe $z_1 - z_2$ frei fällt.

38.2.2. Der Druck in einem Rohr mit einer Verengung

Abb. 38.7. zeigt ein horizontales Rohr mit einer Verengung an der Stelle (2), das von einer Flüssigkeit durchströmt wird. An den Stellen (1), (2) und (3) wird der statische Druck p_1, p_2 und p_3 mit den Manometern M_1, M_2 und M_3 gemessen.

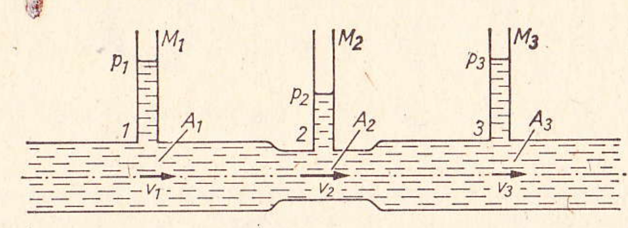


Abb. 38.7. Druckverhältnisse in einem Rohr mit Verengung

Wegen $A_1 = A_3$ ist nach der Kontinuitätsgleichung $v_1 = v_3$ und damit nach der *Bernoulli*schen Gleichung $p_1 = p_3$. Jedoch ist $A_2 < A_1$ und damit $v_2 > v_1$. Dafür ergibt die *Bernoulli*sche Gleichung

$$p_2 = p_1 - \tfrac{1}{2}\varrho(v_2^2 - v_1^2).$$

Der statische Druck an der Stelle (2) ist demnach kleiner als bei (1). Im folgenden werden zwei Anwendungsbeispiele für diese Tatsache erläutert.

38.2.3. Die Wasserstrahlpumpe

In der Anordnung nach Abb. 38.7. kann durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der Druck an der Stelle (2) unter den Außendruck gesenkt werden. Dann existiert dort ein Unterdruck. In einer Wasserstrahlpumpe wird dadurch eine Flüssigkeit oder ein Gas durch das Saugrohr angesaugt. Ein mit dem Saugrohr verbundenes Gefäß kann so evakuiert werden (vgl. Abb. 38.8.).

38.2.4. Das Venturi-Rohr

Mit diesem Gerät (vgl. Abb. 38.9.) wird die Druckdifferenz $p_1 - p_2$ gemessen. Dafür gilt nach dem *Bernoulli*schen Gesetz

$$p_1 - p_2 = \tfrac{1}{2}\varrho(v_2^2 - v_1^2) \quad \text{mit} \quad v_1 A_1 = v_2 A_2 = I$$

$$= \frac{1}{2}\varrho v_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right) = \frac{1}{2}\varrho \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right) I^2.$$

Daraus folgt

$$I = k\sqrt{p_1 - p_2} \quad \text{mit} \quad k = \text{konstant.}$$

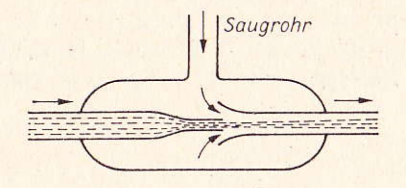


Abb. 38.8. Wasserstrahlpumpe

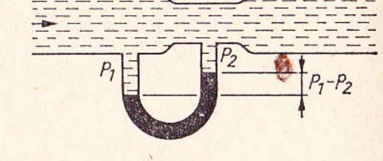


Abb. 38.9. *Venturi*-Rohr

Aus der Druckdifferenz $p_1 - p_2$ kann somit die Stromstärke I bestimmt werden. Dazu kann man das Manometer der Abb. 38.9. direkt in $m^3\,s^{-1}$ eichen. Durch die Stromstärke I ist das Volumen der Flüssigkeit gegeben, die in der Zeit t durch das *Venturi*-Rohr geströmt ist. In der Praxis wird das *Venturi*-Rohr deshalb als Durchflußmengenmeßgerät verwendet.

38.3. Innere Reibung

Bisher wurde stets eine inkompressible Modellflüssigkeit ohne innere Reibung betrachtet. In der Realität treten jedoch bei der Bewegung von Flüssigkeiten Reibungskräfte auf. Da die Reibung von Flüssigkeiten völlig andere Eigenschaften als die Reibung zwischen festen Körpern hat, nennt man sie im Gegensatz zur äußeren Reibung auch innere Reibung (vgl. Text 35.).

Um die Reibungsvorgänge in bewegten Flüssigkeiten zu verstehen, betrachtet man zwei ebene parallele Platten der Fläche A, zwischen denen sich eine Flüssigkeitsschicht der Dicke z befindet. Um die eine Platte mit konstanter Geschwindigkeit gegen die andere Platte zu verschieben, muß eine konstante Kraft wirken, weil die Flüssigkeit der Bewegung einen Widerstand entgegensetzt. Die Ursache dieses Widerstandes ist die Reibungskraft F_R, für die gilt (vgl. Abb. 38.10.)

$$F_R = \eta A \frac{v}{z}.$$

Hier ist η eine temperaturabhängige Stoffkonstante der untersuchten Flüssigkeit. Sie heißt:

dynamische Viskosität	$\eta = \dfrac{F_R z}{A v}$	$[\eta] = 1\ \text{Pa} \cdot \text{s}$

η ist ein Maß für die innere Reibung in der Flüssigkeit. Die Tabelle 38.1. zeigt einige Beispiele.

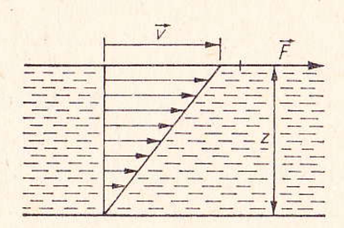


Abb. 38.10. Geschwindigkeitsverteilung in einer Flüssigkeit

Die Reibungskraft ist, wie man aus der Gleichung erkennt, nicht vom Material der Platten abhängig. Demzufolge findet die Reibung nur in der Flüssigkeit statt und nicht zwischen Flüssigkeit und Platte. Unmittelbar an der Platte bildet sich eine relativ zu ihr ruhende, fest anliegende Flüssigkeitsschicht. In dem betrachteten Beispiel für die innere Reibung nimmt die Geschwindigkeit linear mit z ab. An der bewegten Platte hat die Flüssigkeit die Geschwindigkeit v der Platte, an der ruhenden ist die Geschwindigkeit null. Die Geschwindigkeitsverteilung kommt in dem Term v/z zum Ausdruck.

Tabelle 38.1. Dynamische Viskosität verschiedener Stoffe

Flüssigkeit	dynamische Viskosität η in 10^{-3} Pa s bei 20 °C
Wasser	1,008
Äthylalkohol	1,25
Äthyläther	2,55
Glyzerin	1 490

Ist die Flüssigkeitsschicht zwischen den Platten dicker als ein bestimmter Wert D, den man als Dicke der Grenzschicht bezeichnet, so bewegt sich nicht mehr die gesamte Flüssigkeitsschicht, sondern nur eine Schicht der Dicke D. Dafür gilt die folgende Näherungsgleichung:

Dicke der Grenzschicht	$D \approx \sqrt{\dfrac{\eta \cdot l}{\varrho \cdot v}}$

Hier ist l die Länge des bewegten Körpers, in Abb. 38.10. die Länge der oberen, bewegten Platte.
In einem Rohr besteht eine laminare Strömung, wenn v genügend klein und $z < D$ ist. In einer laminaren Parallelströmung ist die Strömungsgeschwindigkeit in einem Punkt proportional zum Abstand dieses Punktes von der Wand des Rohres.
Auch eine Kugel kann laminar umströmt werden. Wegen der inneren Reibung wirkt dabei auf sie eine Kraft, die nach dem *Stokes*schen Gesetz bestimmt wird:

*Stokes*sches Gesetz	$F = 6\pi r \eta v$

r ist der Radius der Kugel. Die auf die Kugel wirkende Kraft kann gemessen und daraus die Viskosität berechnet werden.

Wortliste zum Text

die Aerodynamik, o.
an/saugen A (durch A) (sein)
aus/strömen (aus D)
aus/weichen (D)
wich aus, ausgewichen (sein)
die Durchflußmenge, –n
durchströmen A
der Ethylalkohol, o.
der Ethylether, o.
das Glyzerin, o.
die Grenzschicht, –en
die Hydrodynamik, o.
die Kontinuität, o.
laminar
stationär
stauen A
strömen (durch A) (sein)
die Stromröhre, –n
die Strömung, –en
umströmen A
der Unterdruck, ⸚e
das *Venturi*-Rohr, –e
verdrängen A (durch A)
die Verengung, –en
verlassen A
die Viskosität
die Wasserstrahlpumpe, –n

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Unter welcher Bedingung gelten die Gesetze der Hydrodynamik auch für Gase?
2) Unter welcher Voraussetzung bewegen sich die Teilchen auf den Stromlinien?
3) Was versteht man unter einer Stromröhre?
4) Welche Gesetze gelten für eine Stromröhre?
5) Welcher Zusammenhang besteht im Stromlinienbild zwischen Querschnittsfläche der Stromröhre, Dichte der Stromlinien und Strömungsgeschwindigkeit?

6) Welche Druckverhältnisse bestehen in einem Staupunkt?
7) Wodurch entsteht der dynamische Druck?
8) Wozu verwendet man ein *Venturi*-Rohr?
9) Unter welchen Bedingungen gilt die *Bernoulli*sche Gleichung?
10) Welche Einheit hat die dynamische Viskosität?
11) Wovon ist die Viskosität abhängig?
12) Was versteht man unter der Grenzschicht?
13) Was ist eine laminare Strömung?
14) Worüber macht das *Stokes*sche Gesetz eine Aussage?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Beschreibung von Flüssigkeitsströmungen

2.1.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*

Was versteht man unter

(1) einer Strömung?
(2) einer Stromlinie?
(3) einer Stromröhre?
(4) einem Stromfaden?
(5) der Strömungsgeschwindigkeit?
(6) der Stromstärke?
(7) einer stationären Strömung?
(8) einer Ausweichströmung?
(9) einer Parallelströmung?

2.1.2. *Sprechen Sie* über die qualitative und quantitative Beschreibung einer Strömung!

2.1.3. *Vergleichen Sie* die Strömungsfelder einer Parallelströmung und einer Ausweichströmung bezüglich des Stromlinienverlaufs!

2.1.4. *Interpretieren Sie* die Kontinuitätsgleichung und die *Bernoulli*sche Gleichung!

2.1.5. *Erläutern Sie die Gleichung*

$p + \frac{\varrho}{2} v^2 = p_0$ am Beispiel einer Ausweichströmung!

2.2. Beispiele für Flüssigkeitsströmungen

2.2.1. *Erläutern Sie*, wie sich Geschwindigkeit und dynamischer Druck in einer waagerechten Rohrleitung mit veränderlichem Querschnitt ($A_1 > A_2$) ändern! Welche Schlußfolgerung kann man daraus für die Änderung des statischen Druckes ziehen?

2.2.2. *Erklären Sie* die Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe der *Venturi*düse!

2.2.3. *Erläutern Sie* Aufbau und Wirkungsweise der Wasserstrahlpumpe!

2.3. Innere Reibung

2.3.1. *Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!*

(1) $\eta = \frac{F_R \cdot z}{A \cdot v}$ (3) $F = 6\pi r \eta v$

(2) $D \approx \sqrt{\frac{\eta \cdot l}{\varrho \cdot v}}$

2.3.2. *Erläutern Sie* den Begriff der dynamischen Viskosität an Beispielen!

3. Übungen zum Thema

3.1. Druckmessung

3.1.1. *Unterscheiden Sie* an einem Beispiel den statischen Druck, den Gesamtdruck und den dynamischen Druck einer Strömung, und nennen Sie Möglichkeiten zur Messung der verschiedenen Drücke!

3.1.2. *Beschreiben Sie* die Messung

(1) des statischen Druckes,
(2) des Gesamtdruckes und
(3) des dynamischen Druckes!

3.2. Anwendung der Gesetze der Hydrodynamik

3.2.1. *Leiten Sie* eine Formel für die Ausflußgeschwindigkeit aus einem Gefäß unter dem Einfluß eines inneren Überdruckes p_1 *her* (vgl. Abb. 38.11.)!

(Außerhalb des Gefäßes herrsche der Atmosphärendruck p_0; man vernachlässige die Schwerkraft und die Geschwindigkeit des Flüssigkeitsspiegels im Gefäß.)

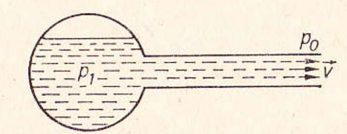


Abb. 38.11.

3.2.2. *Begründen Sie*, weshalb ein ausfließender Wasserstrahl nach unten immer dünner wird!

3.3. Das aerodynamische Paradoxon

Begründen Sie das aerodynamische Paradoxon!

3.4. Innere Reibung

Beschreiben Sie ein Experiment zur Bestimmung der dynamischen Viskosität!

4. Textaufgaben

221. Durch eine Rohrleitung von 250 mm lichter Weite drückt eine Pumpe stündlich 450 m³ Wasser. Welche Strömungsgeschwindigkeit hat das Wasser?

222. Auf welchen Durchmesser muß ein 8 cm weites Rohr verengt werden, damit sich die Strömungsgeschwindigkeit verdoppelt?

223. Das Manometer einer *Venturi*düse in Abb. 38.12. zeigt einen Druckunterschied $p_1 - p_2$. Wie groß ist die Geschwindigkeit v_1 im Rohr mit dem Querschnitt A_1 in Abhängigkeit vom Druckunterschied, von der Dichte der Flüssigkeit und vom Verhältnis der Querschnittsflächen?

224. Bei einem Flugzeug zeigt ein *Prandtl*sches Staurohr einen Staudruck von $2{,}87 \cdot 10^3$ Pa. Wie groß ist die Relativgeschwindigkeit des Flugzeuges gegenüber der Luft (0 °C, $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa; $\varrho_{Luft} = 1{,}293 \text{ kg m}^{-3}$)?

225. In ein Gefäß strömt eine Wassermenge der Stromstärke $I = 150 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ hinein. Am Boden des Gefäßes ist eine Öffnung von $A = 0{,}5 \text{ cm}^2$ Querschnittsfläche vorhanden. In welcher Höhe stellt sich ein konstanter Wasserstand im Gefäß ein, wenn man die Verengung des ausströmenden Wasserstrahls vernachlässigt?

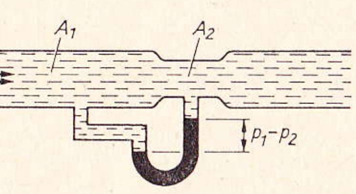


Abb. 38.12.

Abb. 38.13.

226. Ein rechtwinklig gebogenes Rohr (vgl. Abb. 38.13.) wird in die strömende Flüssigkeit gelegt. Wie hoch steigt die Flüssigkeit in diesem Rohr, wenn sie in einem geraden Rohr eine Steighöhe h_1 erreicht und wenn die Strömungsgeschwindigkeit v_1 ist?

227. Ermitteln Sie die Endgeschwindigkeit eines fallenden Regentropfens in Luft (Auftrieb berücksichtigen), wenn der Tropfen als Kugel mit dem Radius $r = 1 \cdot 10^{-3}$ cm und die dynamische Viskosität der Luft mit $\eta = 1{,}8 \cdot 10^{-4} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angenommen wird!

39. Die Rotation des starren Körpers

In den Texten 20. bis 27. wurde die Mechanik der Punktmasse behandelt. Dabei wurden auch Systeme von Punktmassen untersucht, wie z. B. bei den *Kepler*schen Gesetzen und beim Impulserhaltungsgesetz. Bei der Herleitung der Gesetze der kinetischen Gastheorie wurde das Gas auch als System von Punktmassen betrachtet.
Falls das Modell ‚Punktmasse' versagt, weil die Abmessungen der untersuchten realen physikalischen Objekte nicht zu vernachlässigen sind, so kann an seiner Stelle oft das Modell ‚starrer Körper' verwendet werden.

▶ Ein starrer Körper ist ein System von Punktmassen, deren gegenseitige Abstände sich unter der Wirkung von Kräften nicht ändern.

Das bedeutet, daß ein starrer Körper konstante Form und konstante Größe hat.
Die Translation des starren Körpers wird durch die Translation der Punktmasse erfaßt (vgl. Text 20.). Seine Rotation muß jedoch besonders behandelt werden. Da bei der Rotation eines starren Körpers verschiedene Punktmassen im allgemeinen verschiedene Bahngeschwindigkeiten haben, ist es nicht möglich, die Untersuchung auf eine Punktmasse zu beschränken.
In Maschinen und Fahrzeugen gibt es eine große Anzahl rotierender Teile. Schwungräder, Wellen, Räder usw. kann man als starre Körper betrachten, die eine Drehbewegung ausführen. Deshalb muß man bei der Konstruktion von Maschinen und Fahrzeugen genau wissen, wie sich diese Teile bei der Rotation verhalten, welche kinetische Energie sie aufnehmen bzw. abgeben, welche Kräfte zu ihrer Beschleunigung notwendig sind und welche Wirkung sie auf andere Teile der Maschine haben. Die dabei entstehenden Fragen kann man nur beantworten, wenn man die Rotation starrer Körper genauer untersucht.

39.1. Freiheitsgrade

Eine frei bewegliche Punktmasse kann sich im Raum in drei zueinander senkrechten Richtungen bewegen. Eine beliebige Bewegung einer Punktmasse kann man in Bewegungskomponenten in diese drei Richtungen zerlegen. Man sagt deshalb:

▶ Eine frei bewegliche Punktmasse hat drei Freiheitsgrade der Translation.

Gleichbedeutend ist die Aussage, daß die Lage einer Punktmasse im Raum durch drei Koordinaten gegeben ist.
Dementsprechend hat ein System von n freien Punktmassen $3n$ Freiheitsgrade der Translation. Rotation ist bei Punktmassen nicht möglich, da sie keine Ausdehnung besitzen.
Im Gegensatz zur Punktmasse kann der starre Körper rotieren, und eine beliebige

Rotation kann in Komponenten in bezug auf drei zueinander senkrechte Drehachsen zerlegt werden. Das bedeutet:

▶ Ein frei beweglicher starrer Körper hat drei Freiheitsgrade der Translation und drei Freiheitsgrade der Rotation.

Folgerichtig wird die Lage eines starren Körpers im Raum durch 6 Koordinaten beschrieben. Dazu muß nämlich die Lage von drei nicht auf einer Geraden liegenden Punkten des Körpers gegeben sein. Drei solche Punkte seien A, B und C (vgl. Abb. 39.1.). Einen der Punkte, z. B. den Punkt A, kann man als freien Punkt betrachten. Er hat deshalb 3 Freiheitsgrade. Wenn der Punkt A festgelegt ist, kann sich der zweite Punkt B wegen der Konstanz seines Abstandes zu A nur noch auf der Oberfläche einer Kugel um A mit dem Radius $r = \overline{AB}$ bewegen. B hat also 2 Freiheitsgrade. Werden A und B festgehalten, so kann sich C (und ebenso jeder weitere Punkt des starren Körpers) nur noch auf einer Kreisbahn senkrecht zur Achse $\overline{AB}$ bewegen. C hat also einen Freiheitsgrad. Weitere Freiheitsgrade sind nicht vorhanden.

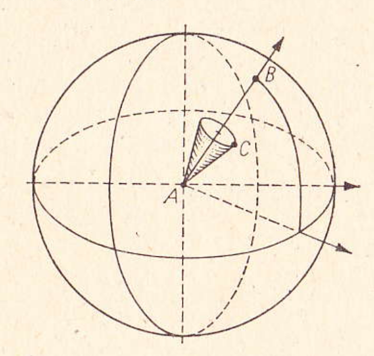


Abb. 39.1. Zur Erklärung der Freiheitsgrade des starren Körpers

In der Praxis ist die Zahl der Freiheitsgrade eines starren Körpers im allgemeinen geringer als 6. So hat ein Rotor in einem Kraftwerksgenerator nur einen Freiheitsgrad, da die einzige mögliche Bewegung die Rotation um eine feste Achse ist.
Die Grenzen des Modells ‚ideales Gas' hängen eng mit der Zahl der berücksichtigten Freiheitsgrade der Gasmoleküle zusammen. Wenn die Gasmoleküle als Punktmassen angesehen werden, so wird nur ihre Translation betrachtet, und es wird vernachlässigt, daß die Moleküle auch rotieren können. Dadurch tritt in den Gleichungen auch nur die kinetische Energie der Translation auf, und die kinetische Energie der Rotation der Moleküle wird nicht untersucht, so daß die Gleichungen nur angenähert gelten*.
Im folgenden werden starre Körper untersucht, die um eine gegebene Achse rotieren.

---

* Tatsächlich sind die mehratomigen Gasmoleküle weder Punktmassen noch starre Körper, so daß mehr als 6 Freiheitsgrade vorhanden sein können: In den Molekülen tritt auch Schwingungsenergie auf.

39.2. Rotationsenergie und Trägheitsmoment

Die kinetische Energie E_{rot} der Rotation eines starren Körpers kann nicht durch den Term $\frac{1}{2}mv^2$ beschrieben werden, da nicht alle Massenelemente dm die gleiche Bahngeschwindigkeit v haben. Die Summation der Rotationsenergie der Massenelemente führt zu einer neuen physikalischen Größe, dem Trägheitsmoment. Die Rotationsenergie eines Massenelements dm, das sich mit der Bahngeschwindigkeit $v = r\omega$ bewegt, ist

$$dE_{rot} = \tfrac{1}{2}v^2 \, dm = \tfrac{1}{2}r^2\omega^2 \, dm.$$

Die gesamte Rotationsenergie des starren Körpers ist demnach

$$E_{rot} = \tfrac{1}{2} \int r^2\omega^2 \, dm.$$

Dabei ist die Winkelgeschwindigkeit ω für alle Massenelemente dieselbe, also nicht von r bzw. dm abhängig:

$$E_{rot} = \tfrac{1}{2}\omega^2 \int r^2 \, dm.$$

Das Integral ist das

Trägheitsmoment des starren Körpers	$J = \int r^2 \, dm$	$[J] = 1 \text{ kg m}^2$

Damit ist die

Rotationsenergie des starren Körpers	$E_{rot} = \frac{1}{2}J\omega^2$.

Aus der letzten Gleichung folgt, daß die Rotationsenergie eines starren Körpers bei konstanter Drehzahl dem Trägheitsmoment direkt proportional ist. Körper mit großem Trägheitsmoment besitzen also viel Energie, wenn sie rotieren. Man

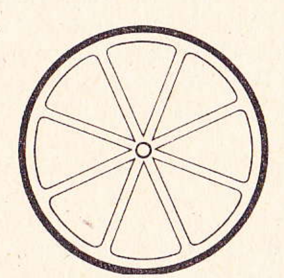


Abb. 39.2. Schwungrad

muß ihnen beim Beschleunigen viel Energie zuführen; sie erreichen deshalb unter sonst gleichen Bedingungen eine gegebene Drehzahl später als Körper mit kleinerem Trägheitsmoment (vgl. Abschnitt 39.4.). Andererseits geben diese Körper mit großem Trägheitsmoment viel Energie ab, wenn ihre Drehzahl verringert wird. Das nutzt man in der Technik bei Schwungrädern. Ein Schwungrad besitzt ein großes Trägheitsmoment, weil sich der größte Teil seiner Masse am Umfang des Rades befindet (vgl. Abb. 39.2.). Ein Schwungrad wirkt wie jeder rotierende Körper als Speicher von Rotationsenergie und trägt in rotierenden Maschinen zum ruhigen Lauf bei, indem es hilft, die Drehzahl konstant zu halten.

39.3. Berechnung von Trägheitsmomenten

Die Berechnung von Trägheitsmomenten setzt die Kenntnis der Funktion $m = f(r)$ voraus, die bei kompliziert geformten Körpern i. a. nicht gegeben ist. Das Trägheitsmoment kann dann überhaupt nicht berechnet, sondern nur gemessen werden, etwa durch Anwendung der Ergebnisse von Abschnitt 39.4. Für starre Körper mit einer einfachen Form ist die Berechnung des Trägheitsmomentes aber in vielen Fällen möglich. Dabei können sich folgende Vereinfachungen ergeben:

(1) Falls der untersuchte starre Körper homogen ist, gilt $\varrho = \frac{dm}{dV} = $ konstant. Damit erhalten wir:

Trägheitsmoment eines homogenen starren Körpers	$J = \varrho \int r^2 \, dV$

(2) Entsprechend der Definition ist das Trägheitsmoment eines Körpers die Summe der Trägheitsmomente der Teile des Körpers. Zur Berechnung des Trägheitsmomentes darf man sich deshalb den betrachteten Körper in beliebiger Weise zerlegt denken.

(3) Es gilt der

Satz von *Steiner*	$J_A = J_S + ma^2$

Hier bedeuten

J_A das Trägheitsmoment des Körpers in bezug auf eine Drehachse g_1 durch den Punkt A,

J_S das Trägheitsmoment in bezug auf eine Drehachse g_2, die parallel zu g_1 durch den Schwerpunkt S des Körpers verläuft,

m die Masse des Körpers und a den Abstand der Achsen g_1 und g_2.

Der Satz von *Steiner* wird wie folgt bewiesen (vgl. Abb. 39.3.):

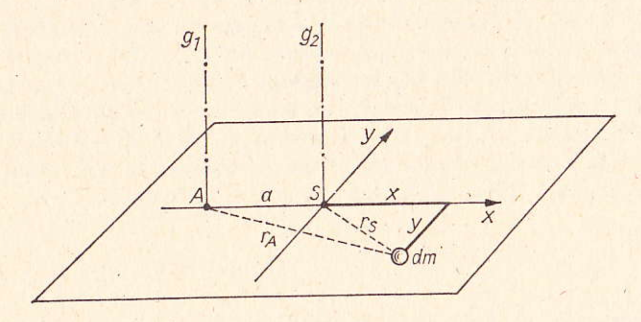


Abb. 39.3. Zum Beweis des Satzes von *Steiner*

Es ist

$$J_A = \int r_A^2 \, dm$$
$$= \int [(a + x)^2 + y^2] \, dm$$
$$= \int [(a + x)^2 + r_S^2 - x^2] \, dm$$
$$= a^2 \int dm + \int r_S^2 \, dm + 2a \int x \, dm$$
$$= ma^2 + J_S,$$

weil $\int x \, dm = 0$ ist (das folgt aus der Definition des Schwerpunktes).
Die Bedeutung des Satzes von *Steiner* besteht darin, daß die Berechnung von J_A mit Hilfe von J_S oft einfacher ist als die direkte Lösung des Integrals $\int r_A^2 \, dm$, weil J_S relativ einfach berechnet werden kann. Das trifft besonders für Körper mit symmetrischer Massenverteilung zu, wie z. B. Rotationskörper.

Lehrbeispiel:

Wie groß ist das Trägheitsmoment J_A eines homogenen dünnen Stabes der Masse m und der Länge l in bezug auf die Drehachse g_1 durch einen Endpunkt des Stabes senkrecht zur Stabachse?

Lösung:
Man bestimmt J_S in bezug auf die zu g_1 parallele Achse g_2 durch den Schwerpunkt und wendet dann den Satz von *Steiner* an (vgl. Abb. 39.4.):

$$J_S = \int r_S^2 \, dm$$

Mit der Dichte ϱ und der kleinen* Querschnittsfläche A ist

$$dm = f(dr) = \varrho A \, dr_S .$$

* Für einen dicken Stab ist r_s innerhalb von dm nicht konstant.

Der Stab wird in zwei gleichwertige Halbstäbe zerlegt. Damit sind die Grenzen des Integrals 0 und $\frac{l}{2}$.

$$J_S = 2 \int_0^{l/2} r_S^2 \varrho A \, dr_S = \left[\frac{2}{3} \varrho A \, r_S^3\right]_0^{l/2} = \frac{1}{12} \varrho A l^3$$

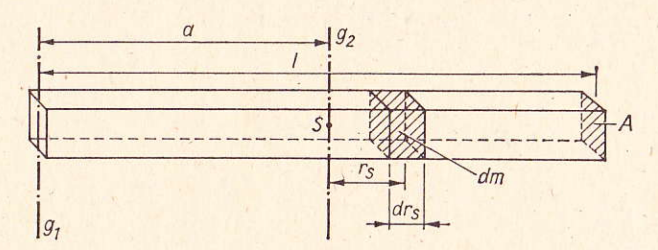


Abb. 39.4. Zum Trägheitsmoment eines Stabes

Mit $\varrho A l = \varrho V = m$ ist

$$J_S = \frac{1}{12} m l^2.$$

Nun ist $a = \frac{l}{2}$. Damit wird

$$J_A = \frac{1}{4} m l^2 + \frac{1}{12} m l^2 = \frac{1}{3} m l^2.$$

In diesem besonders einfachen Beispiel kann J_A allerdings auch leicht direkt berechnet werden:

$$J_A = \int_0^l r_A^2 \varrho A \, dr_A = [\tfrac{1}{3} \varrho A \, r_A^3]_0^l = \tfrac{1}{3} \varrho A l^3 = \tfrac{1}{3} m l^2$$

Bei homogenen Rotationskörpern wendet man folgende Methode an. Die den Rotationskörper erzeugende Funktion wird in der Form $y = f(x)$ dargestellt, und die erzeugende Achse, um die die Kurve dieser Funktion rotiert, wird als x-Achse betrachtet. In bezug auf diese Achse ist das

Trägheitsmoment eines Rotationskörpers (Bedingungen vgl. Text)	$J_x = \frac{1}{2} \pi \varrho \int_{x_1}^{x_2} [f(x)]^4 \, dx$

Zum Beweis denkt man sich den Rotationskörper in flache Zylinder zerlegt (vgl. Abb. 39.5.). Das Massenelement dm eines Zylinders ist die Masse eines dünnen

Hohlzylinders, denn für alle Punkte des Hohlzylinders ist r konstant (vgl. Abb. 39.6.):

$$\mathrm{d}m = 2\pi r \varrho h \,\mathrm{d}r$$

h ist die Höhe des Zylinders.

$$J_{\mathrm{Zyl}} = 2\pi\varrho h \int_0^R r^3 \,\mathrm{d}r = 2\pi\varrho h \left[\tfrac{1}{4} r^4\right]_0^R = \tfrac{1}{2}\pi\varrho h R^4 \qquad (*)$$

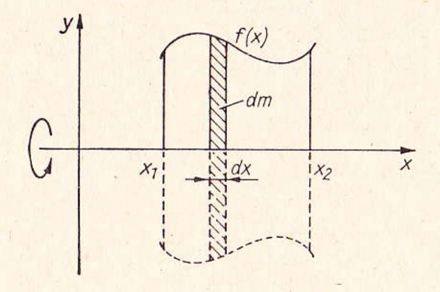


Abb. 39.5. Trägheitsmoment eines Rotationskörpers

Abb. 39.6. Trägheitsmoment eines Zylinders

Nach Abb. 39.5. ist $R = f(x)$ und $h = \mathrm{d}x$. Damit ist

$$J_x = \tfrac{1}{2}\pi\varrho \int_{x_1}^{x_2} [f(x)]^4 \,\mathrm{d}x .$$

Die Gleichung (*) läßt sich mit $m = \pi\varrho h R^2$ zusammenfassen zu

$$J_{\mathrm{Zyl}} = \tfrac{1}{2} m R^2 .$$

In der folgenden Tabelle sind die Trägheitsmomente einiger einfach geformter Körper zusammengestellt.

Tabelle 39.1. Trägheitsmomente

Körper	Drehachse	Trägheitsmoment
dünner Stab, Länge l	durch die Stabmitte senkrecht zum Stab	$\frac{1}{12} m l^2$
dünner Stab, Länge l	durch ein Stabende senkrecht zum Stab	$\frac{1}{3} m l^2$
Zylinder, Radius r	Zylinderachse	$\frac{1}{2} m r^2$
dünne Kreisscheibe, Radius r	Durchmesser	$\frac{1}{4} m r^2$
Hohlzylinder, äußerer Radius r_1, innerer Radius r_2	Zylinderachse	$\frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2)$
dünne rechteckige Platte, Diagonale d	senkrecht durch die Flächenmitte	$\frac{1}{12} m d^2$
dünne rechteckige Platte, Seiten a und b	Seite b	$\frac{1}{3} m a^2$
Kugel, Radius r	Durchmesser	$\frac{2}{5} m r^2$
dünnwandige Hohlkugel, Radius r	Durchmesser	$\frac{2}{3} m r^2$

39.4. Grundgesetz der Dynamik für rotierende Körper

Für die Translation einer Punktmasse bzw. eines starren Körpers gilt das Grundgesetz der Dynamik in der Form

$$\vec{F} = m\vec{a} .$$

Dieses Gesetz kann durch Analogieschluß auf die Drehbewegung übertragen werden. Dabei entspricht der Kraft $\vec{F}$ das Drehmoment $\vec{M}$, der Masse m das Trägheitsmoment J und der Bahnbeschleunigung $\vec{a}$ die Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}$. Damit lautet das

Grundgesetz der Dynamik für die Rotation	$\vec{M} = J\vec{\alpha}$

▶ Das beschleunigende Drehmoment $\vec{M}$ ist gleich dem Produkt aus dem Trägheitsmoment J und der Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}$.

In Analogie zur Bahnbeschleunigung $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$ ist dabei die

Winkelbeschleunigung	$\vec{\alpha} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{\omega}}{\mathrm{d}t}$	$[\alpha] = 1\ \mathrm{s}^{-2}$

Zur Herleitung des Grundgesetzes der Dynamik für die Rotation gehen wir von einem starren Körper aus, der mit der Winkelgeschwindigkeit ω um eine gegebene

Achse g rotiert. Auf ihn wirkt die Kraft F in einer zur Drehachse senkrechten Ebene. r ist der Abstand der Wirkungslinie der Kraft von g. Die von F in der Zeit dt verrichtete mechanische Arbeit dW_m bewirkt eine Änderung dE_{rot} der Rotationsenergie des starren Körpers. Nach dem Energiegesetz ist

$$dW_m = dE_{rot}.$$

Wir haben nun

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{F\,ds}{dt} = Fv = Fr\omega = M\omega \quad \text{und}$$

$$\frac{dE_{rot}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}J\omega^2\right) = J\omega\frac{d\omega}{dt} = J\omega\alpha$$

$$M\omega = J\omega\alpha$$

$$M = J\alpha$$

Da J eine skalare Größe ist, gilt diese Gleichung analog für $\vec{M}$ und $\vec{\alpha}$, da beide vektoriellen Größen die Richtung der Drehachse haben.
Aus $M = 0$ folgt $\alpha = 0$ und ω = konstant. Damit kann das Trägheitsgesetz für einen rotierenden Körper formuliert werden:

▶ Ein starrer Körper dreht sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, wenn kein Drehmoment auf ihn wirkt.

39.5. Drehimpuls und Drehimpulserhaltungssatz

Aus $\vec{M} = J\vec{\alpha}$ folgt

$$\int_0^t \vec{M}\,dt = J\int_0^t \vec{\alpha}\,dt = [J\vec{\omega}]_0^t = J(\vec{\omega}_t - \vec{\omega}_0) = \vec{L}_t - \vec{L}_0.$$

Die hier auftretende vektorielle Größe ist der

Drehimpuls des starren Körpers	$\vec{L} = J\vec{\omega}$	$[L] = 1\ \text{m}^2\,\text{kg}\,\text{s}^{-1}$

Auch der Drehimpuls ist eine vektorielle Größe in Richtung der Drehachse des Körpers. Damit läßt sich das oben hergeleitete Ergebnis wie folgt formulieren:

(1) Ein Drehmoment bewirkt an einem starren Körper eine Änderung des Drehimpulses.

(2) Wenn auf einen starren Körper kein Drehmoment wirkt, so ist sein Drehimpuls konstant.

Der letzte Satz läßt sich auf ein System von rotierenden starren Körpern erweitern.

Man erhält dann in Analogie zum Impulserhaltungssatz der Translation den

▶ Satz von der Erhaltung des Drehimpulses:
In einem abgeschlossenen System ist die Summe der Drehimpulse konstant.

Dieser Satz ist u. a. von Bedeutung für Kreisel, wie sie in Orientierungssystemen verwendet werden, und für die Himmelsmechanik, die Systeme von rotierenden Himmelskörpern untersucht.

39.6. Gegenüberstellung analoger Translationsgrößen und Rotationsgrößen

Eine Gleichung, die für die Translation einer Punktmasse bzw. eines starren Körpers gilt, kann in eine Gleichung für die Rotation eines starren Körpers umgewandelt werden. Dazu sind die Translationsgrößen entsprechend der Tabelle 39.2. durch Rotationsgrößen zu ersetzen.

Tabelle 39.2. Gegenüberstellung analoger Größen

Translation	Rotation
Weg $\vec{s}$	Drehwinkel $\vec{\varphi}$
Geschwindigkeit $\vec{v}$	Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$
Beschleunigung $\vec{a}$	Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}$
Kraft $\vec{F}$	Drehmoment $\vec{M}$
Masse m	Trägheitsmoment J
Federkonstante k	Richtmoment D
Impuls $\vec{I}$	Drehimpuls $\vec{L}$

Beispiele:

(1) Für die Translation mit konstanter Beschleunigung a gilt

$$s = \tfrac{1}{2}at^2 + v_0t + s_0.$$

Unter Benutzung der Tabelle erhält man für die Rotation mit konstanter Winkelbeschleunigung

$$\varphi = \tfrac{1}{2}\alpha t^2 + \omega_0 t + \varphi_0.$$

(2) Der Energiesatz für eine ideale geradlinige Federschwingung lautet

$$\tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2 = \text{konstant}.$$

Entsprechend gilt für eine ideale Drehschwingung mit dem Richtmoment D (vgl. Text 36.)

$$\tfrac{1}{2}J\omega^2 + \tfrac{1}{2}D\varphi^2 = \text{konstant}.$$

Wortliste zum Text

analog
der Analogieschluß, -schlüsse
dementsprechend
dick
der Drehimpuls, –e
dünn
fest/halten A
hielt fest, festgehalten
der Freiheitsgrad, –e
gemäß D
die Himmelsmechanik, o.
der Kreisel, –
der Lauf
mehratomig
die Orientierung, –en
das Schwungrad, ¨er
das Trägheitsmoment, –e
die Winkelbeschleunigung, –en
zusammen/stellen A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einem starren Körper?
2) Was versteht man unter der Zahl der Freiheitsgrade eines physikalischen Objektes?
3) Wieviel Freiheitsgrade hat eine Punktmasse bzw. ein starrer Körper?
4) Welche Arten von Freiheitsgraden sind bei einem starren Körper zu unterscheiden?
5) Welche Freiheitsgrade werden beim Modell ‚ideales Gas' vernachlässigt?
6) Warum gilt die Gleichung $E = \frac{1}{2}mv^2$ nicht für rotierende Körper?
7) Unter welcher Bedingung unterscheiden sich die Trägheitsmomente von Körpern gleicher Masse?
8) Unter welcher Bedingung unterscheiden sich die Trägheitsmomente von homogenen Körpern gleicher Masse, Dichte und Form?
9) Welche Wirkung hat ein Schwungrad?
10) Welche Größen entsprechen einander im Grundgesetz der Dynamik für die Translation und die Rotation?
11) Wie ist die Winkelbeschleunigung definiert?
12) Wie lautet das Trägheitsgesetz für einen rotierenden starren Körper?
13) Wie ist der Drehimpuls definiert?
14) Welche Beziehung besteht zwischen Drehmoment und Drehimpuls?
15) Wie lautet der Satz von der Erhaltung des Drehimpulses?

2. Übungen zum Text

2.1. Freiheitsgrade

Ergänzen Sie den Text!

Jede Bewegung einer frei beweglichen Punktmasse kann in drei zueinander .... Komponenten zerlegt werden. Man sagt deshalb, daß eine frei bewegliche Punktmasse drei .... der Translation hat. Im Gegensatz zur Punktmasse kann ein starrer Körper .... Er hat deshalb außer den drei Freiheitsgraden der .... noch drei Freiheitsgrade der .... Zur Beschreibung der Lage eines frei beweglichen .... Körpers im Raum braucht man deshalb .... Koordinaten.

Translation
Rotation
senkrecht
starr
Freiheitsgrad
sechs
rotieren

2.2. Das Trägheitsmoment

2.2.1. *Beantworten Sie folgende Fragen!*

(1) Wie ist das Trägheitsmoment eines starren Körpers definiert?
(2) Welche Bedeutung hat die Größe des Trägheitsmoments eines starren Körpers für die Rotation?
(3) Welche Vereinfachung bringt die Berechnung von Trägheitsmomenten mit Hilfe des Satzes von *Steiner*?

2.2.2. *Leiten Sie* den Satz von *Steiner her*!

2.2.3. *Erläutern Sie* das Lehrbeispiel zum Satz von *Steiner*!

2.2.4. *Vergleichen Sie* anhand der Tabelle 39.1. die Trägheitsmomente von Körpern bezüglich der Lage der Drehachse, und *begründen Sie* die Ergebnisse mit Hilfe der Definition des Trägheitsmomentes!

2.2.5. *Interpretieren Sie* die Gleichung $E_{rot} = \frac{1}{2}J\omega^2$!

2.3. Das Grundgesetz der Dynamik für rotierende Körper

2.3.1. *Übertragen Sie durch Analogieschluß* das Grundgesetz der Translation auf die Rotation!

2.3.2. *Interpretieren Sie* die Gleichung für das Grundgesetz der Rotation!

2.3.4. *Leiten Sie* das Grundgesetz für die Rotation *her*!

2.3.5. *Vergleichen Sie* das Trägheitsgesetz für die Rotation mit dem Trägheitsgesetz für die Translation!

2.4. Der Drehimpuls

Begründen Sie den Wahrheitswert folgender Aussagen!

(1) Einen Drehimpuls kann man auch für Punktmassen definieren.
(2) Der Drehimpuls ist eine vektorielle Größe.
(3) Der Drehimpuls hat die Richtung der Winkelgeschwindigkeit.
(4) Der Drehimpuls eines Systems ist konstant.
(5) Die Richtung von Drehimpuls und Winkelbeschleunigung stimmen überein.

3. Übungen zum Thema

3.1. Analogien

3.1.1. *Sprechen Sie* über Möglichkeiten und Grenzen von Analogieschlüssen!

3.1.2. *Sprechen Sie* über Analogiebildungen zwischen geradliniger Bewegung und Kreisbewegung!

3.1.3. *Sprechen Sie* über Analogiebildungen zwischen Translation und Rotation anhand der Tabelle 39.2.!

3.1.4. *Bilden Sie* anhand der Tabelle 39.2. analoge Gleichungen!

3.2. Interpretation von Gleichungen

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $s = v \cdot t$

(2) $L = 0$

(3) $\varphi = \frac{\alpha}{2} t^2 + \omega_0 t + \varphi_0$

(4) $M = \frac{dL}{dt}$

(5) $F = \frac{d(m \cdot v)}{dt}$

3.3. Drehimpulserhaltungssatz

3.3.1. *Formulieren* und *begründen Sie* den Drehimpulserhaltungssatz!

3.3.2. *Sprechen Sie* über die Bedeutung des Drehimpulserhaltungssatzes für die Rotation der Erde!

3.3.3. *Sprechen Sie* über die Funktionsweise eines Kreiselkompasses!

3.3.4. *Erklären Sie* folgenden Vorgang! Wenn man auf einem sich drehenden Stuhl sitzt, so kann man die Drehzahl durch eine Bewegung der Arme beeinflussen. Beim Ausbreiten der Arme verringert sich die Drehzahl, beim Anziehen der Arme vergrößert sie sich. Diese Erscheinung wird deutlicher, wenn man in jede Hand ein großes Massenstück nimmt.

3.3.5. *Beschreiben* und *erklären Sie* Experimente, mit denen man die Gültigkeit des Drehimpulserhaltungssatzes nachweisen kann!

4. Textaufgaben

228. Welches Trägheitsmoment hat ein 4 m langer Stab, der eine Masse von 8 kg hat, wenn sich die Achse im Stab 80 cm von einem Ende entfernt befindet? Die Achse steht senkrecht auf dem Stab.

229. Bestimmen Sie das Trägheitsmoment eines geraden Kreiskegels bei Rotation um seine Symmetrieachse! (Grundkreisradius r, Höhe h, Dichte ϱ)
Anleitung: Betrachten Sie den Kegel als Rotationskörper um die x-Achse!

230. Welchen Durchmesser hat eine Kreisscheibe von 8 kg Masse, deren Trägheitsmoment in bezug auf eine senkrechte Achse durch ihren Mittelpunkt 1,69 kg m² beträgt?

231. Ein Hohlzylinder hat einen äußeren Durchmesser von 58 cm und einen inneren Durchmesser von 50 cm. Seine Höhe beträgt 6 cm. Bezüglich der Symmetrieachse beträgt sein Trägheitsmoment 0,8058 kg m². Wie groß ist seine Dichte?

232. Welche Rotationsenergie besitzt ein Schwungrad, dessen Trägheitsmoment 5 kg m² beträgt, bei einer Drehzahl von 5000 min⁻¹?

233. Das Trägheitsmoment eines Turbinenrades beträgt 637 kg m². Das treibende Wasser erzeugt ein Drehmoment von 147 Nm. Wie lange dauert es, bis eine Drehzahl von 320 min⁻¹ erreicht ist?

234. Ein Schwungrad wird aus der Ruhe zum Rotieren gebracht. Sein Trägheitsmoment bezüglich der Drehachse beträgt 63,6 kg m². Wie groß muß das wirkende Drehmoment sein, wenn in 20 Sekunden eine Winkelgeschwindigkeit von 31,4 s⁻¹ erreicht werden soll?

235. Welche Geschwindigkeit erreicht eine Kugel, die auf einer geneigten Ebene reibungsfrei die Höhe h durchläuft?
Anmerkung: Die Anfangsenergie der Kugel wird in Translations- und Rotationsenergie umgewandelt.

236. Ein Vollzylinder (Schleifstein) mit einem Durchmesser von 150 cm rotiert mit einer Drehzahl von 300 min⁻¹ um seine Achse. Sein Trägheitsmoment beträgt 30 kg m². Er soll durch eine am Umfang wirkende Bremskraft von 58,9 N zum Stillstand gebracht werden. Wie lange dauert der Bremsvorgang, und wieviel Umdrehungen finden während des Bremsens noch statt?

Fortsetzung Elektrik

40. Wechselstrom und Wechselstromwiderstände

Der Wechselstrom hat gegenüber dem Gleichstrom eine Reihe von Vorteilen. Das sind z. B. die Transformierbarkeit von Wechselströmen und die Tatsache, daß man für Wechselstrom besonders einfache Elektromotoren konstruieren kann. Deshalb haben Wechselströme in der technischen Praxis eine außerordentliche Bedeutung, und fast die gesamte Elektroenergieversorgung wird mit Wechselstrom durchgeführt.

40.1. Sinusförmiger Wechselstrom und sinusförmige Wechselspannung

Allgemein versteht man unter einem Wechselstrom einen Strom, der seine Stärke und seine Richtung periodisch ändert. Für technische Zwecke wird der Begriff eingeschränkt:

► Ein Wechselstrom ist ein Strom, dessen Momentanwerte eine periodische Funktion der Zeit darstellen und den arithmetischen Mittelwert null haben.

Von allen Wechselströmen, die nach dieser Definition denkbar sind, haben für die Elektroenergieversorgung nur sinusförmige Wechselströme Bedeutung. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe.
Erstens lassen sich solche Ströme bequem durch einen Generator erzeugen. Man geht dabei von einer Spule mit N Windungen und der Fläche A aus, die in einem homogenen Magnetfeld der Induktion B gleichförmig mit der Winkelgeschwindigkeit ω gedreht wird, so daß sich der magnetische Fluß in der Spule periodisch ändert (vgl. Abb. 40.1.). Der Fluß Φ in der Spule ist dabei

$$\Phi = AB \cos \varphi \quad \text{mit} \quad \varphi = \omega t .$$

Durch diesen veränderlichen Fluß wird in der Spule eine Spannung induziert, die nach dem Induktionsgesetz berechnet werden kann:

$$u = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d \cos \omega t}{dt} = NAB\omega \sin \omega t .^*$$

* Von hier an werden die Momentanwerte von Spannung, Stromstärke, Leistung usw. betrachtet. Man bezeichnet sie mit den Kleinbuchstaben u, i, p usw.

Man erkennt aus dieser Herleitung, daß in der Spule eine Spannung induziert wird, deren Abhängigkeit von der Zeit durch eine Sinusfunktion beschrieben werden kann. Weiter sieht man, daß der Maximalwert dieser Spannung $u_{max} = NAB\omega$ ist.

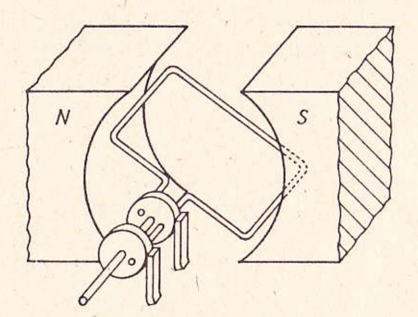


Abb. 40.1. Prinzip des Wechselstromgenerators

Damit ergibt sich:

Funktionsgleichung der Momentanwerte der sinusförmigen Wechselspannung	$u = u_{max} \sin \omega t$

Diese sinusförmige Wechselspannung kann einen sinusförmigen Wechselstrom mit der Funktionsgleichung $i = i_{max} \sin \omega t$ hervorrufen. Der zeitliche Verlauf ist in Abb. 40.2. dargestellt.

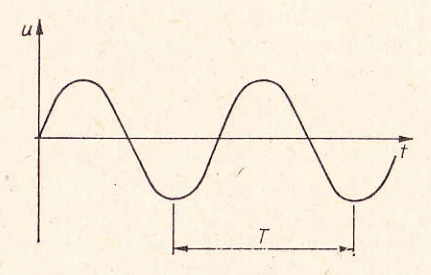


Abb. 40.2. Sinusförmige Wechselspannung

Der zweite Grund für die große Bedeutung von sinusförmigen Wechselströmen in der Technik ist die Tatsache, daß ein sinusförmiger Wechselstrom beim Transformieren wieder einen sinusförmigen Wechselstrom ergibt. Im Gegensatz dazu ändern alle nicht sinusförmigen Wechselströme beim Transformieren ihre Kurvenform (vgl. Text 19.5.).

40.2. Die Messung von Wechselstromgrößen

40.2.1. Die Messung der Frequenz des Wechselstromes

Aus den genannten Gleichungen geht hervor, daß ein sinusförmiger Wechselstrom durch den Maximalwert i_{max} und die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ vollständig beschrieben ist. Die Frequenz f kann mit einem Zungenfrequenzmesser gemessen werden (vgl. Abb. 40.3.).

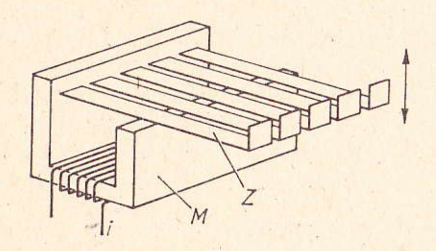


Abb. 40.3. Zungenfrequenzmesser

In diesem Meßgerät liegt eine Reihe von schwingungsfähigen Stahlzungen Z mit definierten Eigenfrequenzen über einem Elektromagneten M, der von dem Strom i durchflossen wird, dessen Frequenz man bestimmen will. Im Wechselfeld dieses Magneten, das durch den Strom i erzeugt wird, führen die Stahlzungen erzwungene Schwingungen aus. Dabei kommt eine Zunge zur Resonanz. Die Frequenz des Wechselstromes muß deshalb gleich der Eigenfrequenz dieser Zunge sein (vgl. Text 28.4.). Normale Zungenfrequenzmesser haben einen Meßbereich von 45 Hz bis 55 Hz bei einer Meßgenauigkeit von 0,5 Hz.

40.2.2. Definition und Messung der Effektivwerte von Stromstärke und Spannung

Da der Momentanwert i der Stromstärke des Wechselstroms sich ständig mit der Zeit ändert, ist er für die Beschreibung des Wechselstromes ungeeignet. Für die Praxis ist es notwendig, den Wechselstrom durch Angabe eines konstanten Wertes der Stromstärke zu beschreiben. Dazu könnte man den Maximalwert verwenden. Das führt aber zu einem falschen Bild, ein Mittelwert ist besser geeignet. Jedoch kann der arithmetische Mittelwert nicht verwendet werden, weil er nach Definition null ist. Zu einem für die Messung brauchbaren Mittelwert gelangt man erst dann, wenn man von der elektrischen Arbeit ausgeht, die der Wechselstrom verrichtet. Man berechnet diese Arbeit und bestimmt dann die Stromstärke eines konstanten Gleichstromes, der unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe elektrische Arbeit verrichten würde. Die Stärke dieses Gleichstromes nennt man die Effektivstromstärke I des Wechselstromes. Man vergleicht also den Wechselstrom mit einem Gleichstrom, der dieselbe Arbeit verrichtet, und verwendet die Stärke dieses Gleichstroms als Maß für die Stärke des Wechselstroms.

► Die Effektivstromstärke eines Wechselstromes ist die Stromstärke eines Gleichstromes, der unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe elektrische Arbeit wie der Wechselstrom verrichtet.

Für die Berechnung der Effektivstromstärke geht man von einem Wechselstrom mit der Gleichung $i = i_{max} \sin \omega t$ aus, der durch einen elektrischen Leiter mit dem Widerstand R fließt. Dabei wird elektrische Arbeit in Wärmeenergie umgewandelt. Dieser Prozeß läuft mit der Momentanleistung $p = i^2 R$ ab. Die elektrische Arbeit ist durch $W_{el} = \int p \, dt$ gegeben. Während einer Halbperiode wird deshalb die folgende elektrische Arbeit verrichtet:

$$W_{el} = \int_0^{T/2} i^2 R \, dt = i^2_{max} R \int_0^{T/2} \sin^2 \omega t \, dt$$

$$= \frac{1}{2} i^2_{max} R \int_0^{T/2} (1 - \cos 2\omega t) \, dt$$

$$= \frac{1}{2} i^2_{max} R \left[t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right]_0^{T/2} = \frac{1}{2} i^2_{max} R \frac{T}{2} = \frac{1}{4} i^2_{max} R \cdot T.$$

Ein konstanter Gleichstrom der Stärke I verrichtet in derselben Zeit $T/2$ in demselben Widerstand R die elektrische Arbeit $\frac{1}{2} I^2 RT$. Diese Werte der elektrischen Arbeit werden gleichgesetzt (vgl. Abb. 40.4.):

$$\tfrac{1}{4} i^2_{max} RT = \tfrac{1}{2} I^2 RT.$$

Daraus folgt die Stärke des Gleichstroms, d. h. für die Effektivstromstärke des Wechselstromes:

Effektivstromstärke des sinusförmigen Wechselstromes	$I = \frac{1}{2}\sqrt{2}\, i_{max} \approx 0{,}71 i_{max}$

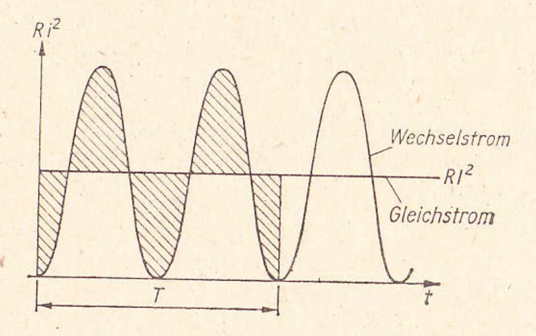


Abb. 40.4. Elektrische Arbeit bei Wechselstrom und bei Gleichstrom

Aus einer entsprechenden Überlegung erhält man für den Wert der Effektivspannung:

Effektivspannung	$U = \frac{1}{2}\sqrt{2}\, u_{max} \approx 0{,}71 u_{max}$

Stromstärke- und Spannungswerte für Wechselstrom sind stets Effektivwerte, wenn das nicht ausdrücklich anders angegeben wird.
Für die Messung von Wechselstromstärken ist ein spezielles Meßgerät entwickelt worden, das Dreheisengerät. Es arbeitet nach folgendem Prinzip (vgl. Abb. 40.5.): Der Strom, dessen Stärke gemessen werden soll, fließt durch eine Spule, in der sich zwei Stücke weichmagnetischen Eisens befinden. Das eine ist fest angebracht,

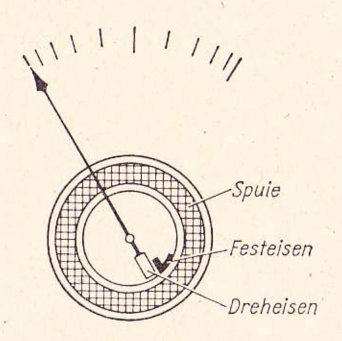


Abb. 40.5. Dreheisenmeßwerk

das andere ist auf einer Welle drehbar gelagert. Wenn die Spule von einem Strom durchflossen wird, werden die Eisenstücke gleichartig magnetisiert, so daß das bewegliche vom festen abgestoßen wird. Dadurch dreht sich die Welle mit dem Zeiger. Die Welle trägt eine Spiralfeder, die eine zum Drehwinkel direkt proportionale rücktreibende Kraft erzeugt, so daß eine eindeutige Beziehung zwischen Stromstärke und Zeigerstellung besteht. Wegen der gleichartigen Magnetisierung ist die Kraft stets eine Abstoßungskraft unabhängig von der Änderung der Stromrichtung. Deshalb ist dieses Gerät speziell für Wechselströme geeignet. Die Masse des Zeigers ist so groß, daß er dem schnellen Wechsel der Abstoßungskraft nicht folgen kann. Er zeigt deshalb einen Mittelwert an, der proportional zum Effektivwert der Stromstärke ist.
Wechselspannungen werden prinzipiell in der gleichen Weise gemessen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß ein Spannungsmeßgerät einen hohen Innenwiderstand haben muß.

40.3. Widerstände im Wechselstromkreis

Im Gegensatz zum Gleichstrom sind beim Wechselstrom drei prinzipiell verschiedene Widerstandsarten zu unterscheiden, die man als ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerstand bezeichnet.

40.3.1. Ohmscher Widerstand

Das sind Widerstände, in denen der Wechselstrom nur Wärmewirkung hervorruft. In einem solchen Widerstand R ist nach dem *Ohm*schen Gesetz die Spannung in jedem Moment direkt proportional zur Stromstärke. Es gilt also für die Momentanwerte $u = iR$ und ebenso für die Effektivwerte $U = IR$, und aus $i = i_{max} \sin \omega t$ folgt $u = u_{max} \sin \omega t$.
Das bedeutet, daß i und u in ihrem zeitlichen Verlauf phasengleich sind (vgl. Abb. 40.6.).

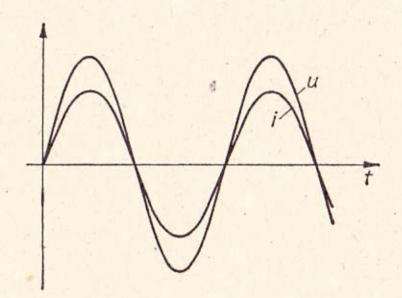


Abb. 40.6. Wechselstrom und -spannung am ohmschen Widerstand

Daraus folgt außerdem, daß ohmsche Widerstände bei Wechselstrom dieselbe Wirkung wie bei Gleichstrom haben.

40.3.2. Induktiver Widerstand

Man geht von einem Wechselstrom $i = i_{max} \sin \omega t$ aus, der durch einen Leiter der Induktivität L und von vernachlässigbarem ohmschen Widerstand fließt. Durch diesen Wechselstrom entsteht am Leiter eine periodische Selbstinduktionsspannung u_{si}, die mit Hilfe des Induktionsgesetzes berechnet werden kann:

$$u_{si} = -L\frac{di}{dt} = -L\omega i_{max} \cos \omega t.$$

Die Selbstinduktionsspannung ist also ebenfalls sinusförmig. Ihr Maximalwert ist $u_{max} = L\omega i_{max}$. Damit ist

$$u_{si} = -u_{max} \cos \omega t.$$

Diese Spannung ist nach dem *Lenz*schen Gesetz eine Gegenspannung. Die Spannung an der Stromquelle, die den Strom i im Leiter hervorruft, ist deshalb

$$u = u_{max} \cos \omega t = u_{max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Daraus sind drei wesentliche Schlußfolgerungen zu ziehen:

(1) Strom und Spannung an einem rein induktiven Widerstand* haben gleiche Kurvenform, wenn man von einem sinusförmigen Wechselstrom ausgeht. Im Gegensatz dazu sind für einen beliebigen Wechselstrom die Kurvenformen von Stromstärke und Spannung nicht gleich. Das ist ein wichtiger Grund für die Bevorzugung von sinusförmigen Wechselströmen (vgl. 40.1.).

(2) Zwischen Stromstärke und Spannung an einem rein induktiven Widerstand existiert eine Phasenverschiebung von $+\frac{\pi}{2}$. Das bedeutet, daß die Spannung ihr Maximum eine Viertelperiode vor der Stromstärke erreicht (vgl. Abb. 40.7.).

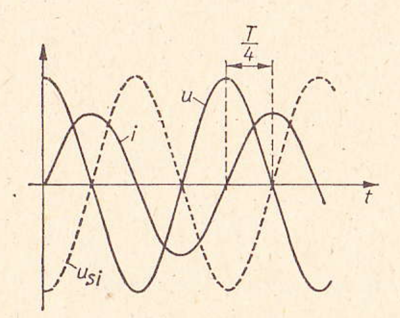


Abb. 40.7. Phasenverschiebung an einem rein induktiven Widerstand

(3) Es ist $u_{max} = L\omega i_{max}$ und damit $U = L\omega I$. Dafür kann $U = X_L I$ mit $X_L = L\omega$ geschrieben werden. Diese Gleichungen sind als eine Form des *Ohm*schen Gesetzes aufzufassen. Es existiert demnach ein induktiver Widerstand $X_L = L\omega$. Er stellt aber nur eine Beziehung zwischen den Maximal- und den Effektivwerten von Stromstärke und Spannung her, während für die Momentanwerte auch die Phasenverschiebung berücksichtigt werden muß:

Induktiver Widerstand	$X_L = \omega L$	$[X_L] = 1\,\Omega$

40.3.3. Kapazitiver Widerstand

Während ein Kondensator** in einem Gleichstromkreis eine Unterbrechung darstellt, wird er in einem Wechselstromkreis ständig geladen und entladen, so daß

* Das ist ein Leiter, der durch Angabe seiner Induktivität L vollständig beschrieben ist (s. o.). Das bedeutet, daß ein elektrischer Strom in ihm nur magnetische Wirkungen hervorruft.

** Wir betrachten ideale Kondensatoren, bei denen die Leitungen und die Platten keinen ohmschen Widerstand und keine Induktivität besitzen.

ein periodischer Ladestrom fließt. Für seine Berechnung nimmt man an, daß eine Wechselspannung $u = u_{max} \sin \omega t$ an einem Kondensator der Kapazität C anliegt und geht von der Ladung q auf dem Kondensator aus:

$$dq = C\,du = i\,dt.$$

Daraus wird die Stromstärke durch Differenzieren bestimmt:

$$i = C\frac{du}{dt} = C\omega\, u_{max} \cos \omega t = i_{max} \cos \omega t = i_{max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

$$u_{max} = \frac{1}{\omega C}\, i_{max} = X_C\, i_{max} \quad \text{mit} \quad X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Das bedeutet:

(1) Die Spannungskurve erreicht ihr Maximum eine Viertelperiode nach der Stromkurve, so daß eine Phasenverschiebung von $-\frac{\pi}{2}$ zwischen Stromstärke und Spannung vorliegt (vgl. Abb. 40.8.).

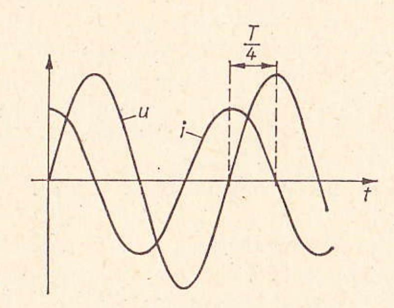


Abb. 40.8. Phasenverschiebung an einem rein kapazitiven Widerstand

(2) Es existiert ein kapazitiver Widerstand $X_C = \frac{1}{\omega C}$ bezüglich der Maximal- und der Effektivwerte von Stromstärke und Spannung.

kapazitiver Widerstand	$X_C = \frac{1}{\omega C}$	$[X_C] = 1\,\Omega$

Wortliste zum Text

an/sehen A als A
sah an, angesehen
denkbar
das Dreheisengerät, -e

die Effektivspannung, -en
die Effektivstromstärke, -n
der Effektivwert, -e
ein/schränken A

hervor/gehen aus D
ging hervor, hervorgegangen (sein)
kapazitiv
der Ladestrom, ⸚e
magnetisieren A
die Phasenverschiebung, -en
die Spiralfeder, -n
die Stahlzunge, -n
die Tatsache, -n
die Transformierbarkeit, o.
weichmagnetisch
der Zungenfrequenzmesser, -

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man in der Technik unter einem Wechselstrom?
2) Wie ist ein sinusförmiger Wechselstrom definiert?
3) Nennen Sie einige Vorteile von sinusförmigen Wechselströmen gegenüber anderen Stromarten?
4) Durch welche Größen kann ein sinusförmiger Wechselstrom beschrieben werden?
5) Woraus besteht ein Zungenfrequenzmesser?
6) Definieren Sie verbal und durch eine Gleichung den Effektivwert der Stromstärke eines sinusförmigen Wechselstromes!
7) Warum ist die Anzeige eines Dreheisengerätes unabhängig von der Stromrichtung?
8) Was versteht man unter einem ohmschen Widerstand?
9) Durch welche Gleichung sind der induktive bzw. der kapazitive Widerstand gegeben, und welche Wirkung haben sie im Wechselstromkreis?
10) Mit welchen Werten von Stromstärke und Spannung wird der ohmsche bzw. der induktive Widerstand definiert?

2. Übungen zum Text

2.1. Allgemeine Beschreibung des Wechselstromes

Ergänzen Sie den Text!

Ein .... Wechselstrom ist durch Angabe seiner .... und seiner Frequenz vollständig beschrieben. Die Frequenz eines Wechselstromes wird mit einem .... gemessen, Spannung und Stromstärke können mit einem .... gemessen werden. Im Wechselstromkreis gibt es drei verschiedene Arten von Widerständen, den ohmschen Widerstand, den .... und den .... Sie unterscheiden sich durch die von ihnen erzeugte ....

Zungenfrequenzmesser
kapazitiv
Widerstand
induktiv
sinusförmig
Phasenverschiebung
Maximalstromstärke
Dreheisengerät

2.2. Einzelbegriffe im Wechselstromkreis

2.2.1. *Unterscheiden Sie* die folgenden Begriffe!

(1) Gleichstrom – Wechselstrom
(2) Maximalstromstärke – Effektivstromstärke
(3) induktiver Widerstand – kapazitiver Widerstand

2.2.2. *Definieren Sie* die folgenden Begriffe!

(1) sinusförmiger Wechselstrom
(2) Frequenz des Wechselstromes
(3) Kreisfrequenz
(4) Effektivstromstärke des Wechselstromes
(5) ohmscher Widerstand
(6) rein induktiver Widerstand

2.3. Erzeugung eines sinusförmigen Wechselstromes

Sprechen Sie über die Erzeugung eines sinusförmigen Wechselstromes, und *leiten Sie* die Gleichung für den Momentanwert der sinusförmigen Wechselspannung *her*!

2.4. Meßgeräte für Wechselstrom

Sprechen Sie über Zungenfrequenzmesser und Dreheisengerät! Verwenden Sie dabei die Antworten auf die folgenden Fragen!

(1) Zungenfrequenzmesser

Aus welchen Hauptteilen besteht ein Zungenfrequenzmesser?
Wo fließt der Wechselstrom, dessen Frequenz bestimmt werden soll?
Was entsteht durch den Wechselstrom?
An welcher Zunge wird die Frequenz abgelesen?

(2) Dreheisengerät

Aus welchen Hauptteilen besteht ein Dreheisengerät?
Wodurch kommt es zur Abstoßung der beiden Eisenstücke?
Warum ist das Gerät besonders für Wechselstrom geeignet?

2.5. Die mathematische Beschreibung des Wechselstromes

2.5.1. *Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!*

(1) $u = u_{max} \sin \omega t$ (3) $X_L = \omega L$

(2) $I = \frac{1}{2}\sqrt{2}\, i_{max}$ (4) $X_C = \frac{1}{\omega C}$

2.5.2. *Leiten Sie* Gleichungen für die folgenden Größen *her*!

(1) Effektivwert der Stromstärke des sinusförmigen Wechselstromes
(2) induktiver Widerstand
(3) kapazitiver Widerstand

3. Übungen zum Thema

3.1. Kapazitiver Widerstand

Leiten Sie eine Gleichung für den kapazitiven Widerstand *her*, indem Sie von der Stromstärke des sinusförmigen Wechselstromes ausgehen und integrieren!

3.2. Elektrolytischer Mittelwert

Für den elektrolytischen Mittelwert I_{ec} eines (gleichgerichteten) Wechselstromes gilt:
Der elektrolytische Mittelwert der Stromstärke eines Wechselstromes ist die Stromstärke eines Gleichstromes, der unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe Ladungsmenge wie der Wechselstrom transportiert.
Berechnen Sie nach dieser Definition I_{ec} für einen sinusförmigen Wechselstrom!

4. Textaufgaben

237. Für eine sinusförmige Wechselspannung gilt $U = 220$ V. Die Frequenz beträgt 50 Hz.
(1) Wie groß ist die Maximalspannung?
(2) Welchen Momentanwert hat die Spannung 0,001 s nach einem Nulldurchgang?
(3) Welchen Momentanwert hat die Spannung 0,01 s nach dem Maximalwert?

238. Das Dielektrikum eines Wickelkondensators isoliert eine konstante Gleichspannung von höchstens 500 V.
Bis zu welcher Wechselspannung darf der Kondensator verwendet werden?

239. Zur Bestimmung der Induktivität von Spulen wird die Stromstärke und die Klemmenspannung gemessen. Welche Induktivitäten ergeben sich bei Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes? Vervollständigen Sie die Tabelle 40.1.!

Tabelle 40.1.

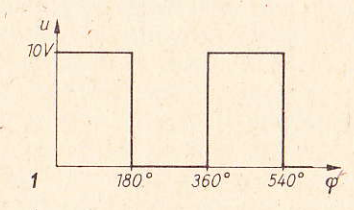
	U	I	f	L
(1)	18 V	2 A	50 Hz	
(2)	125 V	8 A	100 Hz	
(3)	220 V	50 mA	50 Hz	
(4)	5 mV	1 mA	500 kHz	

240. Durch einen Kondensator der Kapazität C fließt unter dem Einfluß einer sinusförmigen Wechselspannung mit dem Effektivwert U und der Frequenz f die Stromstärke I. Vervollständigen Sie die Tabelle 40.2.!

Tabelle 40.2.

	C	U	I	f
(1)	2 µF	220 V		50 Hz
(2)		120 V	3,01 A	100 kHz
(3)	350 pF	100 V	0,132 A	
(4)	100 pF		1,26 µA	1 000 kHz

241. Bestimmen Sie den Effektivwert der Größen nach Abb. 40.9.!



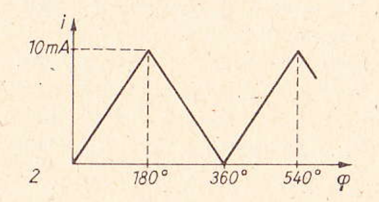


Abb. 40.9.

41. Die Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen

Wie man Widerstände in einem Gleichstromkreis in Parallel- und Reihenschaltungen verbinden kann, so kann man auch Wechselstromwiderstände in Wechselstromkreisen zusammenschalten. Die Kenntnis der dafür geltenden Gesetze ist wichtig, wenn man Wechselstrommotoren, Wechselstromgeneratoren und Transformatoren verstehen will, denn diese Anordnungen enthalten ohmsche und induktive Widerstände in bestimmten Kombinationen, und in anderen Konstruktionen treten noch kapazitive Widerstände dazu.
Für gleichartige Wechselstromwiderstände gelten beim Zusammenschalten die gleichen Gesetze wie für Widerstände in Gleichstromkreisen. Sobald jedoch ungleichartige Wechselstromwiderstände verbunden werden, sind ganz andere Gesetzmäßigkeiten gültig. Für ihre Herleitung verwendet man die Darstellung von Größen des Wechselstromkreises mit Hilfe von Zeigerdiagrammen.

41.1. Die Zeigerdarstellung von sinusförmigen Stromstärken und Spannungen

Sinusförmige Wechselströme sind als harmonische elektrische Schwingungen aufzufassen. Für ihre Untersuchung nutzt man deshalb den Zusammenhang zwischen der harmonischen Bewegung und der gleichförmigen Kreisbewegung (vgl. Text 20.). Bekanntlich kann die harmonische Bewegung als senkrechte Parallelprojektion einer gleichförmigen Kreisbewegung betrachtet werden. Aus diesem Grunde können sinusförmige Wechselströme und -spannungen durch Zeiger dargestellt werden, die in einem rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotieren. Zwar kann man nur feststehende Zeiger zeichnen, muß diese aber stets als Momentbilder von rotierenden Zeigern bewerten.
In dieser Darstellung ist der Betrag der Winkelgeschwindigkeit der Zeiger gleich der Kreisfrequenz von Stromstärke bzw. Spannung, und die Zeigerlänge ist ein Maß für die Maximalwerte. Da die Effektivwerte den Maximalwerten direkt proportional sind, werden sie ebenfalls durch die Zeiger dargestellt. Die Phasenverschiebung wird durch einen Winkel zwischen dem Stromzeiger und dem Spannungszeiger ausgedrückt. Gleichartige Zeiger können durch Konstruktion eines Polygonzuges addiert werden.
Damit erhalten wir die folgenden Darstellungen der Stromstärke und der Spannung am ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerstand (Abb. 41.1.).
In diesen Diagrammen ist der Phasenwinkel stets der kleinere der beiden Winkel zwischen Stromzeiger und Spannungszeiger, und er wird immer vom Stromzeiger ausgehend zum Spannungszeiger hin gemessen. Der Stromzeiger ist in bezug auf den Spannungszeiger so zu zeichnen, daß man das richtige Vorzeichen für den Phasenverschiebungswinkel erhält.

Diese Zeigerdarstellung wird nun auf die Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen angewendet.

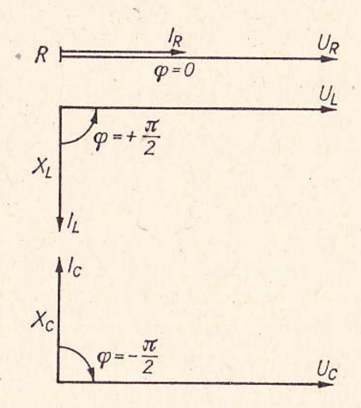


Abb. 41.1. Zeigerdarstellung von Wechselstrom und Wechselspannung am ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerstand

41.2. Die Reihenschaltung von ohmschem, induktivem und kapazitivem Widerstand

41.2.1. R und X_L in Reihe

Die Abb. 41.2. zeigt das zugrundeliegende Schaltbild. Untersucht werden die Gesamtspannung U, die Teilspannungen U_R und U_L am ohmschen Widerstand R bzw. am induktiven Widerstand X_L und die Stromstärke I, die an allen Stellen des Stromkreises dieselbe ist, weil es sich um eine Reihenschaltung handelt.

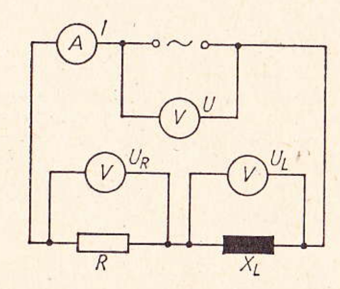


Abb. 41.2. Schaltbild zur Reihenschaltung von R und X_L

Für die Zeigerdarstellung zeichnet man zunächst einen Zeiger für die Stromstärke I. Der Zeiger für U_R liegt in derselben Richtung, da ein ohmscher Widerstand keine Phasendifferenz zwischen Stromstärke und Spannung hervorruft. Dagegen muß

der Zeiger für U_L einen Winkel von $+90°$ mit dem Stromstärkezeiger bilden, da ein rein induktiver Widerstand diesen Phasenwinkel erzeugt. Da U_R und U_L gleichartige Zeiger bilden, addieren sie sich über ein Spannungsdreieck zur Gesamtspannung U. Die Gesamtphasenverschiebung φ ergibt sich als Winkel zwischen I und U, von I aus gemessen (vgl. Abb. 41.3.).
Aus diesem Diagramm lassen sich die folgenden Gleichungen unmittelbar ablesen:

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 \quad \text{und}$$

$$\tan\varphi = U_L/U_R \quad \text{bzw.} \quad \cos\varphi = U_R/U.$$

Zur letzten Gleichung ist zu bemerken, daß man aus ihr das Vorzeichen des Phasenwinkels φ nicht entnehmen kann.
Aus dem Zeigerdiagramm der Stromstärke und der Spannungen läßt sich ein weiteres Diagramm entwickeln. Da sich die Stromstärke I auf alle drei Spannungen U, U_R und U_L bezieht, können die Spannungen durch die gemeinsame Stromstärke dividiert werden. Dadurch entstehen die Größen U/I, U_R/I und U_L/I. Die beiden letzteren erkennen wir als R und X_L. Der Quotient U/I kann als Gesamtwiderstand aufgefaßt werden, den man mit Z bezeichnet. Die Größen R, X_L und Z bilden deshalb ebenfalls ein Zeigerdiagramm. Dabei ist das Widerstandsdreieck dem Spannungsdreieck ähnlich (vgl. Abb. 41.4.).

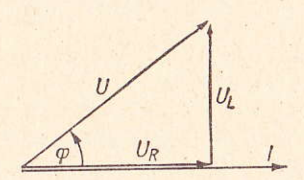


Abb. 41.3. Zeigerdiagramm der Spannungen und der Stromstärke für eine Reihenschaltung von R und X_L

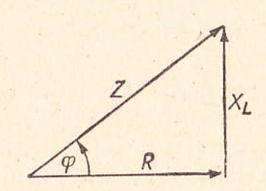


Abb. 41.4. Zeigerdiagramm der Widerstände für eine Reihenschaltung von R und X_L

Es gilt

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 \quad \text{und}$$

$$\tan\varphi = X_L/R \quad \text{bzw.} \quad \cos\varphi = R/Z.$$

In derselben Weise untersucht man weitere Reihenschaltungen.

41.2.2. *R* und X_C in Reihe

Entsprechend den vorangegangenen Überlegungen werden jetzt die Zeigerdiagramme für eine Reihenschaltung von R und X_C betrachtet (vgl. Abb. 41.5. und 41.6.).

Es gilt

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2 \quad \text{und} \quad Z^2 = R^2 + X_C^2 \quad \text{sowie}$$

$$\tan\varphi = -U_C/U_R = -X_C/R.$$

Die Reihenschaltung von X_L und X_C ist von geringerer Bedeutung, da in der Praxis kaum ein Stromkreis untersucht wird, der nur induktive und kapazitive Widerstände, aber keine ohmschen Widerstände enthält. Wichtig ist aber die Untersuchung eines Stromkreises, der alle drei Widerstandsarten in Reihe geschaltet enthält.

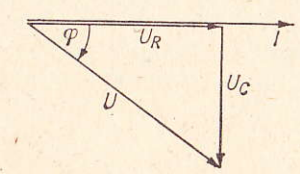


Abb. 41.5. Zeigerdiagramm der Stromstärke und der Spannungen für R und X_L in Reihe

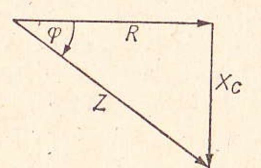


Abb. 41.6. Zeigerdiagramm der Widerstände bei R und X_C in Reihe

41.2.3. *R*, X_L und X_C in Reihe

Da die Zeiger für U_L und U_C einander entgegengerichtet sind, subtrahieren sich ihre Längen arithmetisch, und es entsteht ein Zeiger $U_L - U_C$, der sich mit dem Zeiger für U_R zum Zeiger für die Gesamtspannung U zusammensetzt (vgl. Abb. 41.7. und Abb. 41.8.).

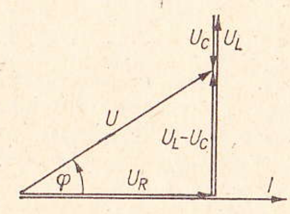


Abb. 41.7. Zeigerdiagramm der Stromstärke und der Spannungen für R, X_L und X_C in Reihe

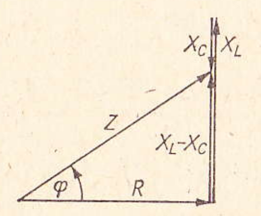


Abb. 41.8. Zeigerdiagramm der Widerstände für R, X_L und X_C in Reihe

Deshalb ist

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 \quad \text{und} \quad Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$$

sowie

$$\tan\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

41.2.4. Kompensation der Phasenverschiebung bei Reihenschaltung

Die letzten Gleichungen zeigen, daß unter der Bedingung $X_L = X_C$ die Phasenverschiebung null und der Gesamtwiderstand Z gleich dem ohmschen Widerstand R ist. In diesem Falle ist die Wirkung des induktiven Widerstandes durch den kapazitiven Widerstand kompensiert worden. Die Stromstärke hängt nur noch von der Gesamtspannung U und vom ohmschen Widerstand ab. Sie kann bei kleinem ohmschen Widerstand hohe Werte erreichen, die an R, X_L und X_C zu erhöhten Spannungsabfällen führen. Durch die große Stromstärke und den hohen Spannungsabfall können die Widerstände beschädigt werden. Die Kompensation der Phasenverschiebung in einer Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen stellt also eine Gefahr für den Stromkreis dar, die in der Praxis vermieden werden muß. Diese Gefahr tritt z. B. auf, wenn man in einem Stromkreis mit R und X_L einen Kondensator in Reihe schaltet.

41.3. Die Parallelschaltung von ohmschem, induktivem und kapazitivem Widerstand

Die Diagramme und Gleichungen für die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen werden in enger Analogie zur Reihenschaltung entwickelt. Bei einer Parallelschaltung ist die Spannung an jedem Schaltelement dieselbe. Deshalb werden diesmal die Stromstärken durch die gemeinsame Spannung dividiert, so daß ein Diagramm der reziproken Werte der Widerstände entsteht.

41.3.1. R und X_L parallel

Das Schaltbild zeigt (vgl. Abb. 41.9.), daß die Spannung U, die Gesamtstromstärke I und die Teilstromstärken I_R und I_L zu betrachten sind. Sie bilden das Zeigerdiagramm nach Abb. 41.10. Hier kann man die Stromstärken durch die gemeinsame Spannung dividieren. Dadurch erhält man die reziproken Werte der Widerstände, die ebenfalls ein Zeigerdiagramm bilden (vgl. Abb. 41.11.).

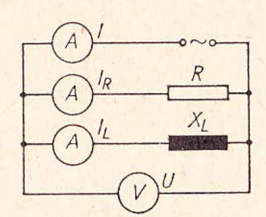


Abb. 41.9. Schaltbild zur Parallelschaltung von R und X_L

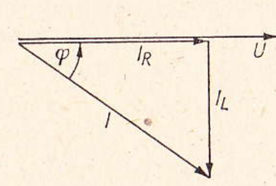


Abb. 41.10. Zeigerdiagramm der Stromstärken und der Spannung bei R und X_L parallel

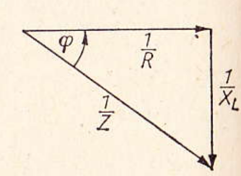


Abb. 41.11. Zeigerdiagramm der reziproken Widerstände bei R und X_L parallel

Es gilt

$$I^2 = I_R^2 + I_L^2 \quad \text{und} \quad \left(\frac{1}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L}\right)^2$$

sowie

$$\tan\varphi = I_L/I_R = R/X_L.$$

41.3.2. R und X_C parallel

Die Abbildungen 41.12. und 41.13. zeigen das Diagramm der Spannungen und der Stromstärken und das Diagramm der reziproken Widerstände. Es gilt

$$I^2 = I_R^2 + I_C^2 \quad \text{und} \quad \left(\frac{1}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2$$

sowie

$$\tan\varphi = -I_C/I_R = -R/X_C.$$

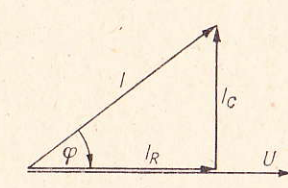


Abb. 41.12. Zeigerdiagramm der Stromstärken und der Spannung bei R und X_C parallel

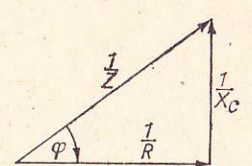


Abb. 41.13. Zeigerdiagramm der reziproken Widerstände bei R und X_C parallel

41.3.3. R, X_L und X_C parallel

Es gilt

$$I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2 \quad \text{und} \quad \left(\frac{1}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2$$

sowie

$$\tan\varphi = \frac{I_L - I_C}{I_R} = \frac{R(X_C - X_L)}{X_L X_C}$$ (vgl. Abb. 41.14. und Abb. 41.15.).

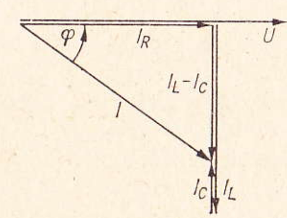


Abb. 41.14. Zeigerdiagramm der Stromstärken und der Spannung bei R, X_L und X_C parallel

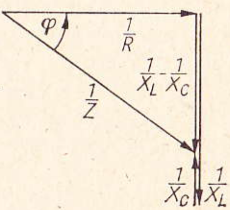


Abb. 41.15. Zeigerdiagramm der reziproken Widerstände bei Z, X_L und X_C parallel

41.3.4. Kompensation der Phasenverschiebung bei Parallelschaltung

Auch für die Parallelschaltung folgt aus der Bedingung $X_L = X_C$, daß die Phasenverschiebung null und der Gesamtwiderstand gleich dem ohmschen Widerstand ist. Im Gegensatz zur Reihenschaltung stellt jedoch hier $Z = R$ den größtmöglichen Wert des Gesamtwiderstandes dar. Das erkennt man aus der Gleichung für den reziproken Wert des Gesamtwiderstandes. $Z = R$ führt demnach zu einem Minimum der Stromstärke, und eine Gefährdung des Stromkreises tritt nicht ein.

Wortliste zum Text

bewerten A
dazu/treten
  trat dazu, dazugetreten (sein)
die Kompensation
kompensieren A (durch A)
sobald
zugrunde/liegen D
  lag zugrunde, zugrundegelegen

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Wofür ist die Kenntnis der Gesetze der Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen notwendig?
2) Warum addieren sich Teilspannungen bzw. Teilstromstärken in Wechselstromkreisen im allgemeinen nach anderen Gesetzen als im Gleichstromkreis?
3) Welche Darstellung verwendet man zur Herleitung der Gesetze für die Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen?
4) Unter welcher Bedingung gelten für Wechselstromwiderstände in einem Wechselstromkreis die gleichen Gesetze wie für Widerstände in einem Gleichstromkreis?
5) Warum gibt die Gleichung $\cos\varphi = R/Z$ nur den Betrag, nicht aber das Vorzeichen des Phasenwinkels?
6) Warum bedeutet die Kompensation der Phasenverschiebung in einer Reihenschaltung eine Gefahr für den Stromkreis?
7) Warum nimmt die Stromstärke bei Phasenkompensation in einer Parallelschaltung den minimalen Wert an?
8) Wie kommt man vom Zeigerdiagramm der Spannungen und Stromstärken zum Zeigerdiagramm der Widerstände bzw. der reziproken Widerstände?
9) Wie wird der Phasenwinkel in den Zeigerdiagrammen dargestellt?

2. Übungen zum Text

2.1. Die Zeigerdarstellung

2.1.1. *Begründen Sie*, warum sinusförmige Ströme und Spannungen durch Zeiger dargestellt werden können!

2.1.2. *Erläutern Sie*, wie mit Hilfe der Zeigerdarstellung Maximalwerte, Effektivwerte und Phasenverschiebungen dargestellt werden!

2.2. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen

2.2.1. *Geben Sie* das Schaltbild und das Zeigerdiagramm für eine Reihenschaltung von

(1) R und X_L,
(2) R und X_C,
(3) R, X_L und X_C

an!

2.2.2. *Erläutern Sie* mit Hilfe der Zeigerdiagramme (Übung 2.2.1.) die Wirkung der verschiedenen Widerstände, und leiten Sie die Gleichungen für die Gesamtspannung, die Gesamtphasenverschiebung und den Gesamtwiderstand her!

2.2.3. *Sprechen Sie* über die Bedingungen für eine Kompensation der Phasenverschiebung sowie über die Wirkung der Kompensation durch Reihenschaltung!

2.3. Die mathematische Darstellung der Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen

Interpretieren Sie die folgenden Gleichungen!

(1) $U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$

(2) $Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$

(3) $\tan\varphi = \dfrac{U_L - U_C}{U_R}$

(4) $I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2$

(5) $\left(\dfrac{1}{Z}\right)^2 = \left(\dfrac{1}{R}\right)^2 + \left(\dfrac{1}{X_L} - \dfrac{1}{X_C}\right)^2$

(6) $\tan\varphi = \dfrac{I_L - I_C}{I_R}$

2.4. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen

2.4.1. *Sprechen Sie* über die Analogie von Reihen- und Parallelschaltung bei der Zeigerdarstellung und den Gleichungen!

2.4.2. *Leiten Sie* aus einem entsprechenden Zeigerdiagramm für die Parallelschaltung von

(1) R und X_L, (2) R und X_C

die Gleichungen für die Gesamtstromstärke und die Gesamtphasenverschiebung *ab*!

2.4.3. *Sprechen Sie* über die Bedingungen für eine Kompensation der Phasenverschiebung sowie über die Wirkung der Kompensation durch Parallelschaltung!

3. Übungen zum Thema

3.1. **Zeigerdarstellung von Wechselstromwiderständen**

Begründen Sie, warum Wechselstromwiderstände bzw. reziproke Wechselstromwiderstände durch Zeiger dargestellt werden können!

3.2. **Zeigerdarstellung von Wechselstromgrößen und vektoriellen Größen**

Sprechen Sie über den Unterschied, der zwischen einem Zeigerdiagramm für Wechselstromgrößen und einer Zeigerdarstellung für vektorielle Größen besteht!

3.3. **Experimente zur Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen**

Beschreiben Sie ein Experiment zur Bestätigung

(1) der Gesetze der Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen,
(2) der Gesetze der Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen,
(3) der Kompensation der Phasenverschiebung durch Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen.

4. Textaufgaben

242. Ein Kondensator von 4 μF liegt in Reihe mit einem ohmschen Widerstand von 795 Ω am 220-V-Netz.
Berechnen Sie den Gesamtwiderstand Z, die Stromstärke I, die Teilspannungen U_R und U_C und den Phasenwinkel φ!

243. Eine reale Spule hat stets sowohl einen ohmschen als auch einen induktiven Widerstand, die als in Reihe geschaltet zu betrachten sind.
Eine solche Spule wird an eine Gleichspannung von 6 V angeschlossen, dabei beträgt die Stromstärke 1,5 A. Wenn sie an eine Wechselspannung von 6 V und 50 Hz angeschlossen wird, so beträgt die Stromstärke 1,2 A.

Berechnen Sie die Induktivität der Spule und den Phasenwinkel für die Messung mit Wechselstrom!

244. Ein elektrisches Wärmegerät nimmt am 220-V-Wechselstromnetz einen Betriebsstrom von 2 A auf. Diese Stromstärke soll zeitweise durch Vorschalten eines Kondensators auf die Hälfte verringert werden, damit sich das Gerät in den Arbeitspausen nicht überhitzt. Welche Kapazität muß der Kondensator haben?

245. Ein ohmscher Widerstand von 100 Ω, eine Spule von 10 mH und vernachlässigbarem ohmschen Widerstand und ein Kondensator von 2,54 μF sind parallelgeschaltet. Welche Gesamtstromstärke und welcher Phasenwinkel ergeben sich für eine Spannung von 10 V bei 50 Hz? Für welche Frequenz tritt Kompensation der Phasenverschiebung ein?

246. In der Schaltung nach Aufgabe 242. wird die Phasenverschiebung durch einen in Reihe geschalteten rein induktiven Widerstand kompensiert. Welche Spannung liegt dann an X_C bzw. X_L an?

247. Eine Spule hat einen ohmschen Widerstand von 100 Ω und eine Induktivität von 1,27 H.

(1) Von welchem Strom wird sie durchflossen, wenn sie an das 220-V-Netz angeschlossen wird?
(2) Zu dieser Spule wird ein Kondensator in Reihe geschaltet, wobei die Netzspannung und die Stromstärke konstant bleiben. Wie groß ist die Kapazität dieses Kondensators?
(3) Durch einen weiteren Kondensator soll die nun vorhandene Phasenverschiebung kompensiert werden. Wie muß er geschaltet werden, und wie groß muß seine Kapazität sein? Welche Spannung liegt dann an der Spule an?
(4) Wählen Sie einen geeigneten Maßstab, und zeichnen Sie für die Teilaufgaben (1) bis (3) maßstabgerechte Zeigerdiagramme für die Widerstände!

42. Die elektrische Leistung im Wechselstrom

Auch für den Wechselstromkreis haben energetische Betrachtungen, wie für alle Gebiete der Physik und der Technik, besondere Bedeutung. Sie hängen direkt mit der Ökonomie der Energiewirtschaft zusammen. Wegen der im Wechselstromkreis im allgemeinen auftretenden Phasenverschiebung sind die Verhältnisse grundlegend anders als im Gleichstromkreis.

42.1. Die Darstellung der elektrischen Leistung im Wechselstromkreis

42.1.1. Die Darstellung der elektrischen Leistung mit Hilfe der Funktionskurven von Stromstärke und Spannung

Die elektrische Leistung P ist durch das Produkt von Stromstärke I und Spannung U gegeben. Falls diese Größen nicht konstant sind, so ist die Momentanleistung p als Produkt der Momentanwerte u und i von Spannung und Stromstärke zu berechnen. Man kann deshalb das Leistungs-Zeit-Diagramm dadurch ermitteln, daß man die Ordinaten der Stromkurve mit den Ordinaten der Spannungskurve punktweise multipliziert. Dabei ist das Ergebnis wesentlich von der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung abhängig. Für einen ohmschen Widerstand, an dem bekanntlich keine Phasenverschiebung auftritt, erhalten wir die Darstellung in Abb. 42.1.:

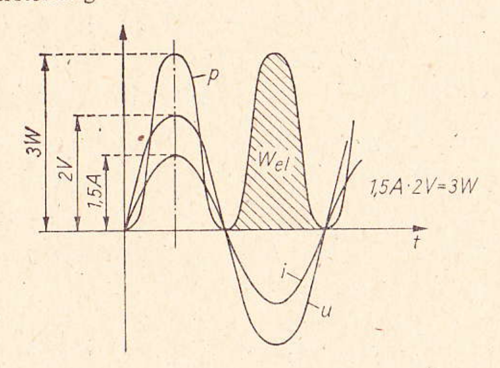


Abb. 42.1. Leistungskurve für $\varphi = 0$

Die Leistungskurve liegt oberhalb der Zeitachse, denn die Leistung ist in jedem Moment positiv, da die Momentanspannung u und die Momentanstromstärke i in jedem Zeitpunkt des gesamten zeitlichen Verlaufs das gleiche Vorzeichen haben. Die verrichtete elektrische Arbeit ist durch die zwischen der Zeitachse und der Leistungskurve liegenden Flächenstücke gegeben.
Ganz andere Verhältnisse ergeben sich bei einer Phasenverschiebung von 90°, wie sie durch einen rein induktiven Widerstand hervorgerufen wird. Auch hier werden Stromstärke und Spannung für jeden Zeitpunkt miteinander multipliziert. Diesmal treten jedoch Zeitintervalle auf, in denen Stromstärke und Spannung entgegengesetztes Vorzeichen haben, so daß man negative Werte der elektrischen Leistung und der Arbeit erhalten muß (vgl. Abb. 42.2.).
Die Leistungskurve befindet sich zu gleichen Teilen im positiven und im negativen Bereich. Die Durchschnittsleistung und damit die Gesamtarbeit während einer Halbperiode von Stromstärke bzw. Spannung sind deshalb null. Der induktive Widerstand nimmt während der ersten Viertelperiode elektrische Energie aus dem Netz auf. Er wandelt diese Energie jedoch nicht in eine andere Energieart um, sondern speichert sie in Form von Energie des magnetischen Feldes. Während der

folgenden Viertelperiode wird das Feld abgebaut, und die gespeicherte Energie wird an die Stromquelle zurückgegeben, so daß Leistung und Arbeit negativ sind.

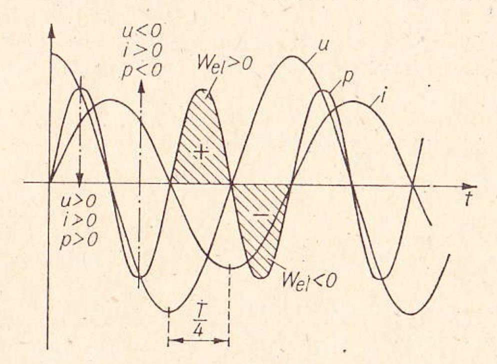


Abb. 42.2. Leistungskurve für $\varphi = 90°$

Dabei ist zwar eine elektrische Leistung vorhanden, die aber nicht zur Energieumwandlung in nichtelektrische Energiearten führt, sondern lediglich dem Aufbau und Abbau eines magnetischen Feldes dient und daher zwischen Spule und Generator pendelt. Sie wird als Blindleistung P_B bezeichnet. Im Gegensatz dazu heißt die Leistung an einem ohmschen Widerstand, an dem stets eine Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie auftritt, Wirkleistung P_W:

► **Die Wirkleistung P_W ist die Leistung in einem Wechselstromkreis, die in nichtelektrische Leistung umgewandelt wird. Die Blindleistung P_B führt nicht zur Umwandlung in nichtelektrische Energie.**

An einem rein kapazitiven Widerstand tritt mit $\varphi = -90°$ ebenfalls nur Blindleistung auf, die das elektrische Feld des Kondensators auf- und abbaut.
Falls die Phasenverschiebung zwischen 0° und +90° bzw. −90° liegt, treten sowohl Wirkleistung als auch Blindleistung auf, und die Leistungskurve liegt dann mit ihrem größeren Teil über der Abszisse und mit ihrem kleineren Teil darunter.
Die Abb. 42.3. zeigt diese Verhältnisse für eine Phasenverschiebung von $\varphi = 45°$.

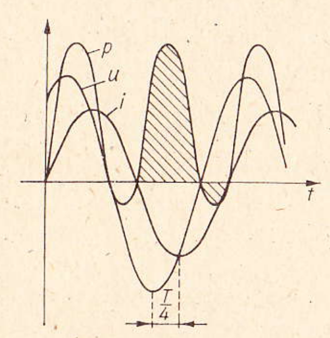


Abb. 42.3. Leistungskurve für $\varphi = 45°$

42.1.2. Die Darstellung der elektrischen Leistung mit Hilfe der Funktionsgleichungen von Stromstärke und Spannung

Ein Wechselstromkreis stehe unter der Momentanspannung $u = u_{max} \sin \omega t$. In ihm fließe ein Strom i, der durch u, den Gesamtwiderstand Z und die Phasenverschiebung φ gegeben ist:

$$i = i_{max} \sin(\omega t - \varphi) \qquad \text{mit} \qquad u_{max} = Z i_{max}.$$

Daraus ist der Momentanwert p der Wirkleistung durch Multiplikation zu berechnen:

$$p = ui = u_{max} \sin \omega t \cdot i_{max} \sin(\omega t - \varphi).$$

Die Wirkleistung $P_W = \bar{p}$ ergibt sich aus dieser Beziehung durch Berechnung des Integralmittelwertes der Momentanleistung für eine Periode. (Eine ähnliche Berechnung wurde in 40.2.2. zur Bestimmung des Effektivwertes der Stromstärke durchgeführt.)

$$P_W = \frac{1}{T}\int_0^T p \, dt$$

$$P_W = \frac{1}{T}\int_0^T u_{max} \sin \omega t \cdot i_{max} \sin(\omega t - \varphi)\, dt$$

$$= \frac{UI}{T}\int_0^T [2 \sin \omega t (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi)]\, dt$$

$$= \frac{UI}{T}\int_0^T (2 \cos \varphi \sin^2 \omega t - \sin \varphi \, 2 \sin \omega t \cos \omega t)\, dt$$

$$= \frac{UI}{T}\int_0^T [\cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - \sin \varphi \sin 2\omega t]\, dt$$

$$= \frac{UI}{T}\left[\cos \varphi \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right) + \sin \varphi \frac{\cos 2\omega t}{2\omega}\right]_0^T$$

$$= \frac{UI}{T}[\cos \varphi (T - 0) + \sin \varphi \cdot 0]$$

$$= UI \cos \varphi.$$

Diese Gleichung bestätigt die Ergebnisse des vorangegangenen Abschnittes. Für einen ohmschen Widerstand ist $\varphi = 0$ und $\cos \varphi = 1$, so daß die Wirkleistung den größtmöglichen Wert $P_W = UI$ annimmt. Bei einer Phasenverschiebung von

$+90°$ oder $-90°$ ist $\cos \varphi = 0$, so daß nur Blindleistung auftreten kann. Für Zwischenwerte von $\cos \varphi$ liegt P_W zwischen 0 und UI. $\cos \varphi$ wird deshalb als Leistungsfaktor bezeichnet.

► Die Wirkleistung ist das Produkt aus der Effektivspannung U, der Effektivstromstärke I und dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$:

Wirkleistung	$P_W = UI \cos \varphi$

42.1.3. Die Darstellung der elektrischen Leistung mit Hilfe des Zeigerdiagramms

Man geht von einem Stromstärke-Spannungs-Zeigerdiagramm für einen Wechselstromkreis aus. Dabei muß man sich entscheiden, welche Schaltung man zugrundelegen will. Wir setzen hier eine Reihenschaltung von R, X_L und X_C voraus (vgl. Abb. 42.4.).
Die Stromstärke I ist für R, X_L, X_C und Z dieselbe. Die Teilspannungen U_R und $(U_L - U_C)$ und die Gesamtspannung U dürfen deshalb mit der gemeinsamen Stromstärke I multipliziert werden. Dadurch entstehen die den Spannungen proportionalen Größen UI, $U_R I$ und $(U_L - U_C) I$ mit

$$U_R I = UI \cos \varphi \qquad \text{und} \qquad (U_L - U_C) I = UI \sin \varphi.$$

Wegen der Proportionalität bezüglich der Spannungen bilden diese Größen ein dem Spannungsdreieck ähnliches Leistungsdreieck (vgl. Abb. 42.5.). Zu demselben Ergebnis kommt man, wenn man von einer Parallelschaltung ausgeht. $UI \cos \varphi$ ist wieder die Wirkleistung P_W. Mit $UI \sin \varphi$ haben wir einen Ausdruck für die Blindleistung P_B erhalten. UI heißt die Scheinleistung P_S des Stromkreises.

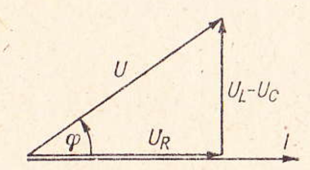


Abb. 42.4. Zeigerdiagramm der Stromstärke und der Spannungen für eine Reihenschaltung von R, X_L und X_C

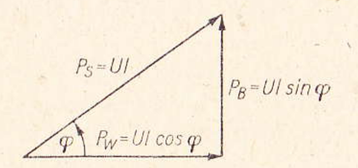


Abb. 42.5. Zeigerdiagramm der Leistungen in einem Wechselstromkreis

Es gilt

$$P_W^2 + P_B^2 = P_S^2.$$

Die Einheit der Wirkleistung ist 1 Watt. 1 W kann auch als Einheit für die Blindleistung und die Scheinleistung verwendet werden. In der technischen Praxis ist es jedoch üblich, das Watt als Voltampere (VA) zu bezeichnen, wenn es als Ein-

heit der Scheinleistung verwendet wird, und als Var (var), wenn es zur Messung der Blindleistung dient:

$$[P_W] = 1\ \mathrm{W}$$
$$[P_B] = 1\ \mathrm{var}$$
$$[P_S] = 1\ \mathrm{VA}$$

Dabei gilt

$$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{var} = 1\ \mathrm{VA}.$$

Im folgenden sind die drei Leistungsgrößen des Wechselstromkreises zusammengestellt:

Wirkleistung	$P_W = UI \cos \varphi$	$[P_W] = 1\ \mathrm{W}$
Blindleistung	$P_B = UI \sin \varphi$	$[P_B] = 1\ \mathrm{var}$
Scheinleistung	$P_S = UI$	$[P_S] = 1\ \mathrm{VA}$

Die vorangegangenen Darlegungen zeigen, daß die Art der elektrischen Leistung im Wechselstromkreis durch die Art des Widerstandes bestimmt wird, an dem sie auftritt. Am ohmschen Widerstand haben wir stets eine Wirkleistung, der ohmsche Widerstand wird deshalb als Wirkwiderstand bezeichnet. Induktive Widerstände und kapazitive Widerstände sind Blindwiderstände, da an ihnen nur Blindleistung auftreten kann. Dementsprechend wird der Gesamtwiderstand als Scheinwiderstand bezeichnet.

42.2. Die ökonomische Bedeutung der Blindleistung

Die Blindleistung ist eine physikalische Leistung (vgl. 42.1.1.). Sie muß im Kraftwerk erzeugt werden und gelangt über das Netz in einen Wechselstromkreis. Dort bleibt sie jedoch im Gegensatz zur Wirkleistung in ihrer Form als elektrische Leistung erhalten und dient dem Aufbau des elektrischen bzw. magnetischen Feldes an einem Blindwiderstand, wobei sie periodisch zum Energieerzeuger zurückfließt. Dabei belastet die Blindleistung den Energieerzeuger und das Netz, d. h., die Leitungen, Schalter, Sicherungen, usw., ohne Energie für die Verbraucher bereitzustellen. Ein Beispiel soll das weiter verdeutlichen. Ein Generator, der für eine Stromstärke von 100 A bei einer Spannung von 10 kV konstruiert ist, also für eine Scheinleistung von 1 000 kVA, kann eine Wirkleistung von maximal 1 000 kW abgeben, wobei der Leistungsfaktor gleich 1 sein muß. Wenn nun im Netz soviel induktive Widerstände vorhanden sind, daß der Leistungsfaktor nur 0,7 ist, so können dem Generator nur 700 kW Wirkleistung entnommen werden. In diesem Falle arbeitet er weniger ökonomisch als vorher. Daraus ergibt sich die Forderung, daß der Leistungsfaktor nahe bei 1 liegen muß. Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie das in der Praxis erreicht werden kann.

42.3. Die Erhöhung des Leistungsfaktors

In der Praxis treten vorwiegend positive Phasenverschiebungen auf. Sie entstehen, wenn Wechselströme durch Spulen fließen. Spulen sind wichtige Bauteile in Motoren und Transformatoren, und sie werden auch als sog. Drosselspulen häufig als Vorschaltwiderstände besonders für Leuchtstofflampen verwendet. Wir haben es deshalb meistens mit induktiven Blindleistungen zu tun. Kapazitive Blindleistungen kommen nur selten vor.

Die induktive Blindleistung P_{BL} einer Spule kann nun durch die kapazitive Blindleistung P_{BC} eines Kondensators kompensiert werden. Wenn nämlich das magnetische Feld an einem induktiven Widerstand seine größte Stärke hat, ist das elektrische Feld an einem Kondensator, der zu diesem induktiven Widerstand in Reihe oder parallelgeschaltet ist, auf Grund der Phasenverschiebung gerade null, und umgekehrt. Dieser Sachverhalt wurde im Text 41. und im Abschnitt 30.1. erklärt. Die Energie, die zum Aufbau der Felder benötigt wird, wird durch die Blindleistung bereitgestellt. Falls Kondensator und Spule die gleiche Blindleistung haben, so wird der Stromquelle überhaupt keine Blindleistung mehr entnommen oder zugeführt, sondern die Blindenergie pendelt nur noch zwischen dem induktiven und dem kapazitiven Widerstand hin und her, ohne dabei die Stromquelle und die Zuleitung von der Stromquelle zu belasten. Damit ist der Leistungsfaktor gleich 1, wenn man die Schaltung als Ganzes betrachtet, und die Stromquelle gibt nur noch Wirkleistung ab:

Kompensationsbedingung	$P_{BL} = P_{BC}$	$\cos \varphi = 1$

In der Praxis ist ein solcher Kompensationskondensator stets parallel zu dem Verbraucher zu schalten, dessen Blindleistung auf diesem Wege kompensiert werden soll. Würde man ihn in Reihe schalten, so würden sich die Werte von Stromstärke und Spannung am gegebenen Verbraucher ändern. Dabei kann es zur Zerstörung des Stromkreises kommen (vgl. 41.2.4.). Strom und Spannung am gegebenen Verbraucher bleiben jedoch konstant, wenn ein Kondensator parallelgeschaltet wird. In diesem Falle ändert sich nur die Stromstärke, die der Stromquelle entnommen wird.

Ein Elektromotor kann grundsätzlich als Reihenschaltung eines Wirkwiderstandes mit einem induktiven Widerstand aufgefaßt werden. Zusammen mit dem Kompensationskondensator erhält man in Abb. 42.6. das folgende Ersatzschaltbild:

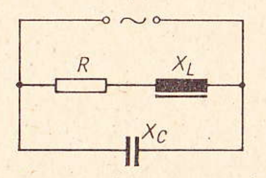


Abb. 42.6. Ersatzschaltbild eines Elektromotors mit Kompensationskondensator

Dieses Schaltbild gilt auch für viele andere Probleme, bei denen Blindleistungen kompensiert werden müssen.
In der Praxis kann die vorhandene induktive Blindleistung direkt gemessen werden oder aus Meßwerten der Wirkleistung und des Leistungsfaktors berechnet werden. Aus diesen Werten kann die Kapazität C eines Kompensationskondensators ermittelt werden. Dabei gehen wir von der Kompensationsbedingung $P_{BL} = P_{BC}$ aus. Nach Abb. 42.6. ist der Kondensator parallelgeschaltet, so daß er an der Netzspannung U liegt:

$$P_{BC} = UI_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2\omega C = P_{BL}$$

$$C = \frac{P_{BL}}{U^2\omega}$$

In der technischen Praxis wird aus ökonomischen Gründen die Phasenverschiebung oft nur verkleinert, statt sie vollständig zu beseitigen. Falls in einem Wechselstromkreis bei konstanter Wirkleistung P_W der Phasenwinkel zur Verbesserung des Leistungsfaktors mit Hilfe eines Kondensators vom Wert φ_1 auf den Wert φ_2 verringert wird, so gilt für die Kapazität C dieses Kondensators und für die von ihm aufgenommene Blindleistung P_{BC}:

$$C = \frac{P_W}{U^2\omega}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad \text{und} \quad P_{BC} = P_W(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2).$$

Wortliste zum Text

die Blindleistung, -en
der Blindwiderstand, ⸚e
die Drosselspule, -n
die Durchschnittsleistung, -en
das Ersatzschaltbild, -er
der Kompensationskondensator, -en
lediglich
der Leistungsfaktor, -en
pendeln
die Scheinleistung, -en
der Scheinwiderstand, ⸚e
das Var, - (Einheit)
das Voltampere, - (Einheit)
die Wirkleistung, -en
der Wirkwiderstand, ⸚e
zugrunde/legen A

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Warum unterscheidet sich die Berechnung der Leistung des Wechselstroms wesentlich von der Berechnung der Leistung im Gleichstromkreis?
2) Welche Möglichkeiten gibt es für die Darstellung der Leistung des Wechselstroms?

3) Welche drei Leistungsgrößen muß man im Wechselstromkreis unterscheiden?
4) Wie ist der Leistungsfaktor definiert?
5) Warum treten in der Praxis vorwiegend induktive Blindleistungen auf?
6) Warum kann ein Kondensator induktive Blindleistungen kompensieren, und wie wird er zu diesem Zwecke geschaltet?
7) Mit welcher Gleichung kann man die Kapazität des Kompensationskondensators berechnen? Erklären Sie die in der Gleichung auftretenden Größen!
8) Warum darf der Kompensationskondensator nicht in Reihe mit dem Gerät geschaltet werden, dessen Phasenverschiebung kompensiert werden soll?
9) Warum kompensiert man Blindleistungen?

2. Übungen zum Text

2.1. Arten der Leistung im Wechselstromkreis

Ergänzen Sie den Text!

Die Leistung an einem ohmschen Widerstand nennt man .... Dagegen tritt an einem induktiven oder kapazitiven Widerstand .... auf. Entsprechend der Art der Leistung unterscheidet man bei Widerständen zwischen .... und .... Die Wirkleistung hängt von cos φ, dem .... ab. Das Produkt $U \cdot I$ bezeichnet man als .... und den Gesamtwiderstand als ....

Blindleistung
Wirkwiderstand
Leistungsfaktor
Scheinleistung
Blindwiderstand
Wirkleistung
Scheinwiderstand

2.2. Die Darstellung der Leistung durch Funktionskurven

Unterscheiden Sie mit Hilfe der Funktionskurven (vgl. Abb. 42.1., 42.2., 42.3.) von u und i Wirkleistung und Blindleistung!
Erläutern Sie den Einfluß der Phasenverschiebung auf diese Leistungen!

2.3. Die mathematische Darstellung der Leistung

2.3.1. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen!

(1) $P_W = UI\cos\varphi$

(2) $P_B = UI\sin\varphi$

(3) $P_S = UI$

2.3.2. *Leiten Sie* die Wirkleistung im Wechselstromkreis aus den Momentanwerten von Stromstärke und Spannung *her*!

2.4. Zeigerdiagramm der Leistung

Beschreiben Sie, wie man das Zeigerdiagramm der Leistungen aus dem Zeigerdiagramm der Stromstärke und der Spannungen erhält!

2.5. Leistungsfaktor

2.5.1. *Sprechen Sie* über die Notwendigkeit und die Möglichkeit der Kompensation der Blindleistung! *Beachten Sie* dabei auch das Ersatzschaltbild (vgl. Abb. 42.6.) sowie die Kompensationsbedingung!

2.5.2. *Sprechen Sie* über die ökonomische Bedeutung der Blindleistung und des Leistungsfaktors!

3. Übungen zum Thema

3.1. Blindleistung am Kondensator

Zeichnen Sie Stromkurve, Spannungskurve und Leistungskurve für einen rein kapazitiven Widerstand, und *erklären Sie*, wie das Aufladen und das Entladen eines Kondensators mit der Leistungskurve und den Flächenstücken zwischen Leistungskurve und Abszisse zusammenhängen!

3.2. Zeigerdiagramme für Parallelschaltung

Entwickeln Sie das Zeigerdiagramm der Leistungen aus dem Zeigerdiagramm der Spannung und der Stromstärken für eine Parallelschaltung von R, X_L und X_C!

3.3. Anwendungen

3.3.1. *Erklären Sie*, warum man einen Elektromotor grundsätzlich als Reihenschaltung von ohmschem und induktivem Widerstand auffassen muß!

3.3.2. Als Vorschaltwiderstand für ein elektrisches Gerät kann sowohl ein ohmscher Widerstand als auch ein induktiver Widerstand (Drosselspule) verwendet werden.
Vergleichen Sie diese beiden Methoden, und stellen Sie dabei den wesentlichen Vorteil bei der Verwendung einer Drosselspule heraus!

3.4. Messung der Wirkleistung

Abb. 42.7. zeigt das Konstruktionsprinzip des dynamischen Meßwerks, das zur Bestimmung der Wirkleistung verwendet wird. Die Stromspule

liegt horizontal und erzeugt ein Magnetfeld, das im wesentlichen senkrecht verläuft.
In diesem Feld befindet sich die drehbar gelagerte Spannungsspule, die den Zeiger trägt und auf die bei Drehung durch zwei Spiralfedern, die auch der Stromzuführung dienen, eine rücktreibende Kraft wirkt. Zur Messung der Wirkleistung läßt man den Strom durch die Stromspule fließen und legt die Spannung über einen Vorschaltwiderstand an die Spannungsspule an.

Erklären Sie, daß auf diese Weise die Wirkleistung bestimmt wird!

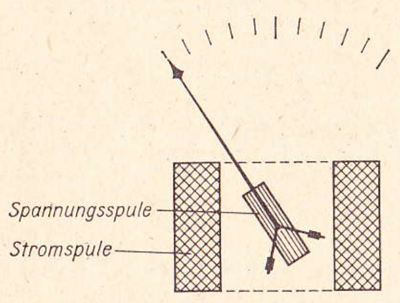


Abb. 42.7.

4. Textaufgaben

248. Berechnen Sie die Leistung, die die Schaltelemente mit den folgenden Kenngrößen am 220-V-Netz aufnehmen!

(1) $R = 48{,}4\ \Omega$ (3) $X_C = 220\ \Omega$

(2) $X_L = 100\ \Omega$ (4) $C = 10\ \mu\text{F}$

249. Ein Wechselstrommotor nimmt am 380-V-Netz 100 A auf. Berechnen Sie Scheinleistung, Wirkleistung und Blindleistung für einen Leistungsfaktor von 0,9!

250. Ein Wechselstromwiderstand nimmt bei einer Spannung von 220 V eine Stromstärke von 4,54 A und eine Wirkleistung von 800 W auf. Welcher Phasenwinkel ergibt sich daraus? Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm der Leistungen!

251. Eine Lampe für eine Betriebsspannung von 100 V und eine Wirkleistung von 500 W wird unter Vorschaltung einer geeigneten Drosselspule am 220-V-Netz betrieben. Die Lampe darf als rein ohmscher Widerstand und die Spule als rein induktiver Widerstand betrachtet werden. Die auftretende Blindleistung wird durch einen parallel zur Stromquelle geschalteten Kondensator kompensiert. Berechnen Sie die Kapazität dieses Kompensationskondensators!

252. Eine Betriebsabteilung nimmt eine Wirkleistung von 200 kW auf, wobei der Leistungsfaktor 0,75 beträgt. Mit Hilfe eines Kondensators soll der

Leistungsfaktor auf 0,9 erhöht werden. Die Betriebsspannung ist 380 V bei 50 Hz.
(1) Welche Blindleistung muß der Kondensator aufnehmen?
(2) Welche Kapazität muß er haben?
(3) Um wieviel Ampere verringert sich die Stromstärke durch Zuschalten des Kondensators?

43. Leitungsvorgänge in Festkörpern

43.1. Die elektrische Leitung in Metallen

43.1.1. Die Elektronentheorie der Metalle

In einem Metall bilden die Atome ein geometrisch geordnetes Kristallgitter. Man nimmt an, daß dabei die Valenzelektronen nicht fest mit den Atomen verbunden sind, sondern sich als Leitungselektronen frei im Kristallgitter bewegen können und sich hierbei wie ein Gas verhalten. Das ist eine Modellvorstellung zur Beschreibung der elektrischen Leitung in Metallen. Die Bewegung des Elektronengases ist völlig ungeordnet. Erst wenn eine elektrische Spannung an das Metall gelegt wird, kommt es zu einer gerichteten Bewegung der Leitungselektronen. Es fließt ein elektrischer Strom. Das Elektronengasmodell wurde 1900 von *P. Drude* aufgestellt und in den folgenden Jahren von *H. A. Lorentz* weiterentwickelt. Es ist die Grundlage für die klassische Elektronentheorie der Metalle.
Mit Hilfe dieses Modells kann man viele elektrische Erscheinungen, z. B. die Entstehung des elektrischen Widerstandes erklären. Man führt den elektrischen Widerstand auf die Wechselwirkung des Elektronengases mit dem Kristallgitter des Metalls zurück. Dabei geht man davon aus, daß die freien Elektronen ständig mit den Ionen des Kristallgitters zusammenstoßen. Sie geben dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie an das Kristallgitter ab und bringen es zum Schwingen. Das Metall erwärmt sich, und die Elektronen werden abgebremst. Das äußert sich makroskopisch als elektrischer Widerstand.
Entsprechend läßt sich auch die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes erklären. Mit Erhöhung der Temperatur werden die Schwingungen des Kristallgitters verstärkt, und die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Elektronen und dem Kristallgitter nimmt zu. Das bedeutet aber, daß sie stärker abgebremst werden und der elektrische Widerstand zunimmt. Das steht in Übereinstimmung mit der Tatsache, daß der spezifische elektrische Widerstand eines Metalls annähernd der absoluten Temperatur proportional ist. Für praktische Zwecke rechnet man mit dem Temperaturkoeffizienten α (vgl. S. 119). Es gilt

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta R_{20}}.$$

Dabei ist R_{20} der elektrische Widerstand bei 20 °C, und ΔR ist die Änderung des Widerstandes, die durch die Temperaturänderung von 20 °C auf die Temperatur ϑ hervorgerufen wird. Danach ist der Widerstand R_ϑ bei der Celsiustemperatur ϑ

$$R_\vartheta = R_{20}(1 + \alpha\,\Delta\vartheta) \quad \text{mit} \quad \Delta\vartheta = \vartheta - 20\ °\text{C}.$$

Die Geschwindigkeit der gerichteten Bewegung der freien Elektronen beim Fließen eines elektrischen Stromes läßt sich berechnen, wenn man weiß, daß in den meisten Metallen jedes Atom ein freies Elektron liefert. In einem Leiter der Länge l mit der Querschnittsfläche A, der aus einem Metall der Dichte ϱ und der molaren Masse m_{mol} besteht, gibt es demzufolge

$$N_e = \frac{L\varrho lA}{m_{\text{mol}}}$$

Leitungselektronen. L ist die *Loschmidt*sche Zahl und gibt die Zahl der Atome bzw. Moleküle (oder anderer Teilchen) in einem Mol an. Es ist $L = 6{,}023 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$. Wenn sich N_e Leitungselektronen in der Zeit t gleichförmig durch den Leiter bewegen, so ist die Geschwindigkeit dieser gerichteten Elektronenbewegung

$$v = \frac{l}{t}$$

und die Stromstärke

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{N_e \cdot e}{t} \quad \text{mit} \quad e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{As}.$$

Daraus folgt

$$\boxed{v = \frac{I m_{\text{mol}}}{\varrho A L e}}$$

Es ist zu beachten, daß in der Elektrotechnik die Leiterquerschnitte A den Stromstärken I entsprechen müssen, weil für den Quotienten $\frac{I}{A}$ ein Höchstwert existiert. Die Geschwindigkeit v liegt deshalb bei $10^{-3}\ \text{m s}^{-1}$. Die Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung der freien Elektronen dagegen ergibt sich aus der kinetischen Gastheorie zu etwa $10^5\ \text{m s}^{-1}$ bei Normtemperatur!

43.1.2. Das Energiebändermodell

Die Leitfähigkeit eines Stoffes hängt wesentlich von der Art der Bindung der Valenzelektronen an die Atome ab. Diesen Zusammenhang kann man mit Hilfe des Energiebändermodells veranschaulichen. Dabei geht man davon aus, daß die Elektronen in einem Atom ganz bestimmte diskrete Energiewerte annehmen können, die man als Linien in einem Energiestufenschema darstellen kann (vgl. Abb. 43.1.). In einem Kristall kommt es nun zu Wechselwirkungen der Elektronen mit

den Ionen des Kristallgitters. Das hat zur Folge, daß ein gegebenes Elektron keinen genau bestimmten Energiebetrag hat, sondern daß seine Energie innerhalb eines bestimmten Intervalls variabel ist. Es ist dann nicht mehr möglich, die einzelnen Energiewerte durch Linien darzustellen. Man erhält dafür ein Energieband, das als Modell für die erlaubten Energiezustände der Elektronen im Kristall angesehen werden muß (vgl. Abb. 43.2.).

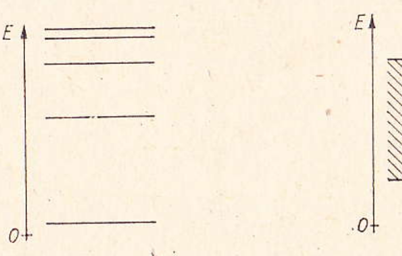


Abb. 43.1. Diskrete Energieniveaus eines einzelnen Elektrons bezüglich eines Atomkerns

Abb. 43.2. Energieband eines Elektrons bezüglich aller Atomkerne und Elektronen eines Körpers

Mit dem Begriff ‚Energieband' ergeben sich folgende Ausdrucksweisen. Wenn man sagt, daß sich ein Elektron im Valenzband befindet, so heißt das, daß es eine solche Energie hat, daß es als Valenzelektron im Gitter gebunden ist. Bei genügend höherer Energie ist es im Leitungsband, d. h., es kann sich als Leitungselektron frei im Gitter bewegen. Zwischen beiden Bändern liegen i. a. Energiebeträge, die von den Elektronen auf Grund atomphysikalischer Gesetze nicht angenommen werden können. Diese Werte der Elektronenenergie bilden eine sogenannte verbotene Zone. Danach ergibt sich für einen elektrischen Leiter ein Energiebändermodell wie in Abb. 43.3.

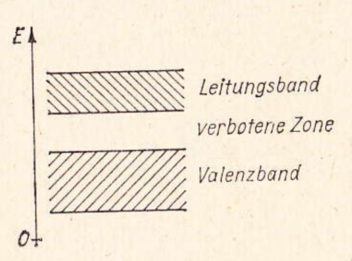


Abb. 43.3. Bändermodell eines Leiters (allgemein)

Ein Metall ist nun dadurch charakterisiert, daß sich Valenzband und Leitungsband teilweise überdecken, so daß genügend viele Valenzelektronen immer als Leitungselektronen zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 43.4.). Dagegen ist bei einem Isolator der Energieunterschied (verbotene Zone) zwischen Valenzband und Leitungsband

so groß, daß auch bei Energiezufuhr, z. B. durch Erwärmung des Isolators, keine Elektronen in das Leitungsband gelangen können (vgl. Abb. 43.5.). Eher wird der Isolator zerstört.

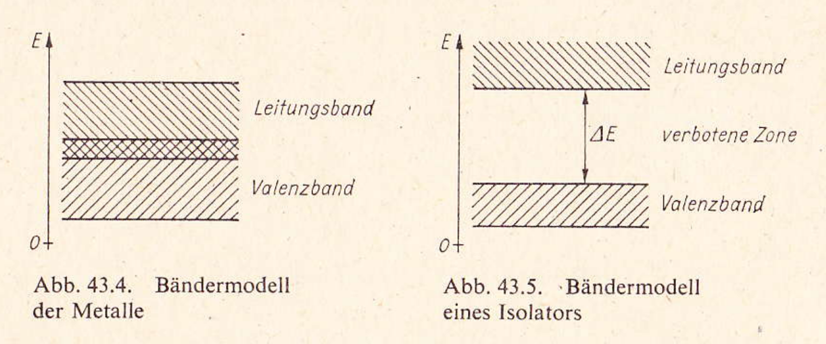


Abb. 43.4. Bändermodell der Metalle

Abb. 43.5. Bändermodell eines Isolators

43.2. Die elektrische Leitung in Halbleitern

43.2.1. Die Eigenleitung

Halbleiter sind Stoffe, deren spezifischer Widerstand zwischen dem der Metalle und der Isolatoren liegt. Sie unterscheiden sich grundsätzlich von diesen Stoffen durch ihren Leitungsvorgang. Chemisch reine Halbleiter verhalten sich bei tiefen Temperaturen wie Isolatoren, bei hohen Temperaturen dagegen wie Metalle. Ihr spezifischer Widerstand sinkt also im Gegensatz zu den Metallen mit steigender Temperatur.

Auch diese Eigenschaften lassen sich mit Hilfe des Energiebändermodells erklären. So sind z. B. beim Germanium die Atome durch Elektronenpaarbindung miteinander verbunden und die Valenzelektronen deshalb im allgemeinen nicht beweglich (vgl. Abb. 43.6.). Durch Aufnahme thermischer Energie können sie aber aus dem Valenzband ins Leitungsband gelangen und damit freie Elektronen für die elektrische Leitung bilden, die hier als Eigenleitung bezeichnet wird. Dafür sind schon relativ geringe Temperaturen ausreichend, wie sie als Umgebungstempera-

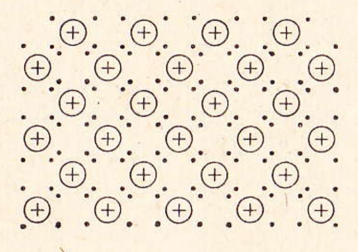


Abb. 43.6. Darstellung des idealen Germaniumkristallgitters. Die Punkte stellen die Valenzelektronen dar. Leitfähigkeit null.

turen auftreten, denn für Elektronen, die sich im Valenzband weit oben befinden (die also bereits erhöhte Energie besitzen), ist die Energiedifferenz zum Leitungsband nur klein (vgl. Abb. 43.7.).

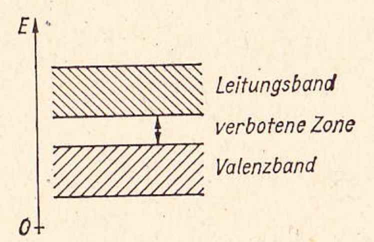


Abb. 43.7. Bändermodell eines reinen Halbleiters

Die Eigenleitung beruht aber nicht nur auf der Bewegung von freien Elektronen. Daneben gibt es noch sogenannte Defektelektronen. Sie entstehen, wenn durch Trennung von Elektronen vom Atom Fehlstellen im Kristall auftreten. Diese Fehlstellen entsprechen positiven Ladungen und sind beweglich, weil sie von gebundenen Elektronen besetzt werden können, so daß an anderen Plätzen Fehlstellen entstehen (vgl. Abb. 43.8.).

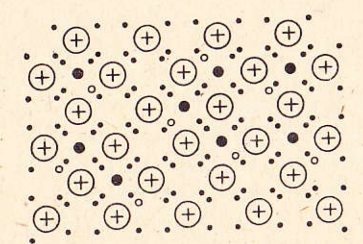


Abb. 43.8. Leitfähiger Reingermaniumkristall

Der Leitungsvorgang im Halbleiter besteht also aus zwei Anteilen: Direkte Bewegung von freien Elektronen und Bewegung von Defektelektronen, d. h. Bewegung von Elektronen in Sprüngen von Fehlstelle zu Fehlstelle. Die Leitfähigkeit des Halbleiters kann deshalb durch Erhöhung der Zahl sowohl der freien Elektronen als auch der Defektelektronen gesteigert werden.
Da der reine Halbleiter als Ganzes neutral ist, muß die Zahl der freien Elektronen mit der Zahl der Defektelektronen übereinstimmen. Ihre Konzentration beträgt in reinem Germanium bei Zimmertemperatur ungefähr $2{,}5 \cdot 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$. Dementsprechend ist der spezifische Widerstand etwa 60 Ωcm.

43.2.2. Die Störstellenleitung

Das Halbleitermaterial kann Fremdatome enthalten. Die Plätze, die sie im Gitter einnehmen, werden als Störstellen bezeichnet. Die Fremdatome beeinflussen die Leitfähigkeit ebenfalls, da sie zusätzlich Ladungsträger erzeugen können, wenn ihre Wertigkeit verschieden von der des Grundmaterials ist. Diese Ladungsträger führen zur Störstellenleitung. Um sie praktisch zu nutzen, muß man einem hochreinen Grundmaterial (höchstens 1 Fremdatom auf 10^9 Atome) definierte Mengen von Stoffen mit anderer Wertigkeit zusetzen. Das wird als Dotieren bezeichnet. Dabei sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden.

43.2.2.1. Überschußleitung (n-Leitung)

Dotiert man das vierwertige Germanium mit einem fünfwertigen Element, wie z. B. Arsen, so existieren an den Störstellen zusätzliche Elektronen, die für die Kristallbildung nicht gebraucht werden (vgl. Abb. 43.9.). Sie werden von den

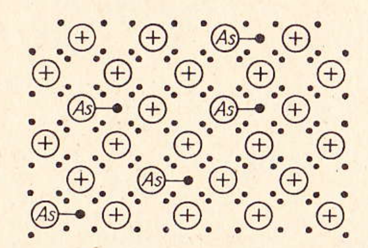


Abb. 43.9. Germaniumkristall mit Donatoren (Arsenatome)

Fremdatomen bei geringer Energiezufuhr abgegeben und bilden zusätzliche freie Elektronen. Die Fremdatome werden deshalb als Donatoren bezeichnet. Gleichzeitig wirkt die Eigenleitung, jedoch in viel geringerem Grade. Es sind also viel mehr freie Elektronen als Defektelektronen vorhanden. Erstere werden deshalb als Majoritätsträger, letztere als Minoritätsträger bezeichnet. Der gesamte Leitungsprozeß ist die Elektronenüberschußhalbleitung oder n-Leitung. Im Bändermodell besetzen die zusätzlichen Elektronen ein Störniveau wenig unterhalb des Leitungsbandes. Von dort können sie leicht ins Leitungsband gelangen (vgl. Abb. 43.10.).

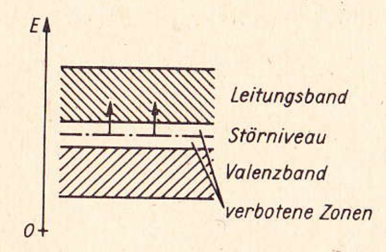


Abb. 43.10. Bändermodell des n-Leiters

43.2.2.2. Mangelleitung (p-Leitung)

Wenn vierwertiges Germanium mit einem dreiwertigen Element, wie z. B. Indium, dotiert wird, fehlen Elektronen an den Störstellen, so daß nun die Defektelektronen die Majoritätsträger und die freien Elektronen die Minoritätsträger sind. Die Indiumatome wirken als Akzeptoren. Das Germanium arbeitet als Elektronenmangelhalbleiter (p-Leiter) (vgl. Abb. 43.11.). Die Fehlstellen bilden ein Störniveau wenig oberhalb des Valenzbandes (vgl. Abb. 43.12.). Dort können sie leicht von Elektronen aus dem Valenzband erreicht werden, das entspricht der Bildung von neuen Defektelektronen.

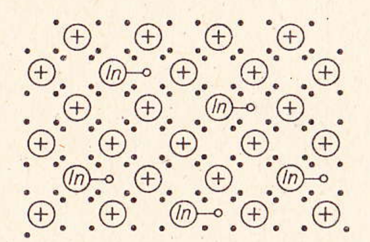


Abb. 43.11. Germaniumkristall mit Akzeptoren (Indiumatome)

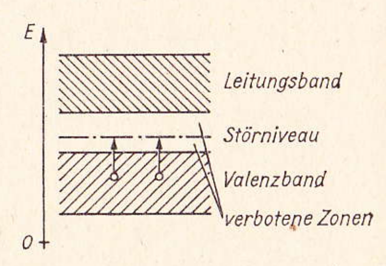


Abb. 43.12. Bändermodell des p-Leiters

43.2.3. Der pn-Übergang

Halbleiter werden für die Herstellung von elektronischen Bauelementen verwendet, die auf vielen Gebieten die Elektronenröhren (vgl. 44.2.) verdrängt haben. Im folgenden werden die Verhältnisse am sogenannten pn-Übergang als Grundlage für das Verständnis der Wirkungsweise vieler Halbleiterbauelemente, wie der Halbleiterdioden und der Transistoren, erläutert.
Ein pn-Übergang ist die Berührungsfläche zwischen einem p-Leiter und einem n-Leiter. Einige freie Elektronen diffundieren aus dem n-Leiter durch den Übergang in den p-Leiter und neutralisieren dort Defektelektronen. Das führt beiderseits des Übergangs zu einer Grenzschicht mit verringerter Ladungsträgerkonzentration und demzufolge erhöhtem Widerstand (vgl. Abb. 43.13.). Die Grenzschicht bleibt schmal, denn durch die Diffusion und Neutralisierung wird das n-Gebiet positiv und das p-Gebiet negativ aufgeladen, so daß keine weiteren Elektronen durch den pn-Übergang gehen können.

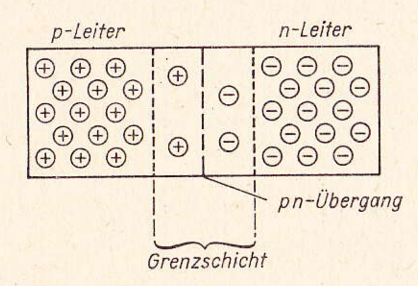


Abb. 43.13. Grenzschicht am pn-Übergang

Wird nun eine solche pn-Kombination nach Abb. 43.14. in einen Stromkreis geschaltet, so werden die Ladungsträger aus der Umgebung der Grenzschicht zu beiden Enden hin abgezogen. Damit ist kein Stromfluß mehr möglich. Die Grenzschicht hat dann die Wirkung einer Sperrschicht. In der Schaltung nach Abb. 43.15. dagegen werden von beiden Seiten Ladungsträger in die Grenzschicht gebracht, die dadurch ihre Wirkung verliert. Die pn-Kombination stellt somit eine Halbleiterdiode dar, die man in der Praxis als Gleichrichter verwenden kann.

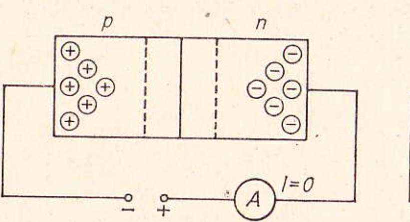


Abb. 43.14. pn-Kombination in Sperrichtung geschaltet

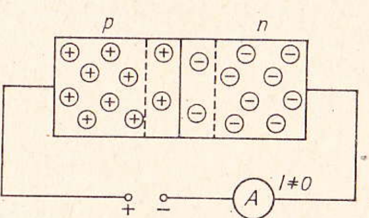


Abb. 43.15. pn-Kombination in Durchlaßrichtung geschaltet

43.2.4. Der Transistor

Die Eigenschaften des pn-Übergangs sind auch die Grundlage für die Funktionsweise des Transistors, der in der Elektronik für die Erzeugung und die Verstärkung von elektrischen Schwingungen und für viele andere Zwecke eine bedeutende Rolle spielt. Im Transistor folgen zwei pn-Übergänge in entgegengesetzter Richtung aufeinander. Dabei ist prinzipiell eine pnp- oder eine npn-Kombination möglich. Wir behandeln hier die pnp-Kombination, wobei alle Ergebnisse mit umgekehrten Richtungen von Spannungen und Stromstärken auch für npn-Transistoren gelten.
Die Abb. 43.16. zeigt schematisch den Aufbau eines pnp-Transistors: Eine schwach n-leitende Halbleiterplatte, die Basis B, trägt zwei Stücke p-leitenden Halbleiter-

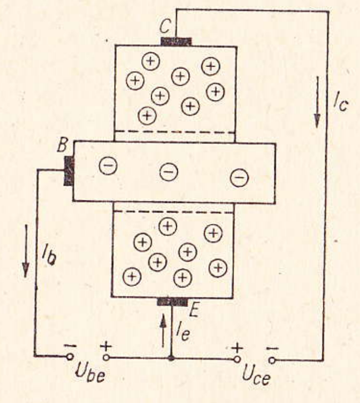


Abb. 43.16. Schema des pnp-Transistors in Emitterschaltung

materials, den Emitter E und den Kollektor C. Zwischen E und C ist die Basis nur wenige Mikrometer dick. Der Transistor besteht also im wesentlichen aus zwei pn-Übergängen in geringem Abstand. Die Abb. 43.17. zeigt das Schaltzeichen des pnp-Transistors.
In elektronischen Geräten wird der Transistor am häufigsten in der sogenannten Emitterschaltung verwendet, wie sie in Abb. 43.16. und 43.17. skizziert ist: Zwischen Basis und Emitter liegt die Basisspannung U_{be}, wobei der pn-Übergang Basis-Emitter in Durchlaßrichtung geschaltet ist. Zwischen Kollektor und Emitter liegt die Kollektorspannung U_{ce} in Sperrichtung, wobei U_{ce} wesentlich größer als U_{be} ist.

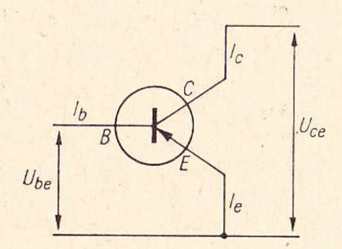


Abb. 43.17. Schaltzeichen des pnp-Transistors in Emitterschaltung

Durch die Basisspannung gelangen Defektelektronen aus dem Emitter in die Basis. Nur wenige von ihnen können aber durch Elektronen der Basis neutralisiert werden, weil die Basis nur schwach mit Donatoren dotiert ist. Es fließt deshalb nur ein geringer Basisstrom I_b. Die meisten Defektelektronen aus dem Emitter können die dünne Basis durchlaufen und unter dem Einfluß der Kollektorspannung in den Kollektor gelangen. Dadurch fließt ein Kollektorstrom I_c. Die Sperrwirkung des pn-Überganges Basis-Kollektor wird also aufgehoben, weil Defektelektronen aus dem Emitter in die Basis kommen. Wenn die Basisspannung verkleinert wird, so sinkt die Zahl der Ladungsträger in der Basis, so daß sich auch der Kollektorstrom verringert. Der Kollektorstrom ist deshalb innerhalb bestimmter Grenzen proportional zum Basisstrom bzw. zur Basisspannung und eine geringe Änderung der Basisstromstärke führt zu einer viel größeren Änderung der Kollektorstromstärke. Diese Beziehungen sind die Grundlage der Verstärkerwirkung des Transistors und der periodischen Energiezufuhr bei der Schwingungserzeugung.

Wortliste zum Text

ab/ziehen A
zog ab, abgezogen
der Akzeptor, –en
das Arsen, o.
beiderseits G
das Defektelektron, –en
diskret
der Donator, –en
dotieren A (mit D)
die Durchlaßrichtung, –en
die Eigenleitung, o.
das Elektronengas, o.

die Elektronenpaarbindung, –en
die Elektronenröhre, –n
der Emitter, –
das Energieband, ¨er
das Energiebändermodell, –e
das Energiestufenschema, –ta
die Fehlstelle, –n
das Germanium, o.
der Gleichrichter, –
die Halbleiterdiode, –n
hochrein
das Indium, o.
der Kollektor, –en
die Leitfähigkeit
der Majoritätsträger, –
die Mangelleitung
der Minoritätsträger, –
der pn-Übergang, ¨e
die Sperrichtung, –en
die Sperrschicht, –en
der Sprung, ¨e
das Störniveau, –s
die Störstelle, –n
der Transistor, –en
überdecken, A (sich)
in Übereinstimmung stehen mit D
die Überschußleitung, o.
das Valenzband, ¨er
das Valenzelektron, –en
zur Verfügung stehen als N
die Wertigkeit, –en
die Zone, –n

Übungen und Aufgaben

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter dem Elektronengas in einem Metall, und welche Eigenschaften hat es?
2) Was sind freie Elektronen?
3) Welche Temperaturabhängigkeit zeigt der Widerstand eines Metalls?
4) Welche beiden Geschwindigkeiten der Elektronenbewegung muß man unterscheiden?
5) Was kann man aus dem Energiebändermodell ablesen?
6) Wie bewegen sich die Ladungsträger bei der Eigenleitung?
7) Was sind Störstellen und Majoritätsträger?
8) Warum bildet sich an einem pn-Übergang eine Grenzschicht mit weniger Ladungsträgern?
9) Was ist eine Halbleiterdiode, und wozu kann man sie verwenden?
10) Warum verringert sich der Widerstand eines Halbleiters bei Temperaturerhöhung?
11) Wie ist ein Transistor aufgebaut?
12) Welcher Zusammenhang bildet die Grundlage für die Wirkung des Transistors als Verstärker?

2. Übungen zum Text

2.1. Die elektrische Leitung in Metallen

2.1.1. *Unterscheiden Sie* die folgenden Begriffe!

Elektronen, freie Elektronen, Valenzelektronen
Leitungselektronen, Elektronengas

2.1.2. *Erklären Sie* mit Hilfe des Elektronengasmodells

(1) den elektrischen Widerstand,
(2) die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes!

2.1.3. *Interpretieren Sie* die folgenden Gleichungen!

(1) $R_\vartheta = R_{20}(1 + \alpha \Delta\vartheta)$ (3) $v = \frac{I m_{mol}}{\varrho A L e}$

(2) $N_e = \frac{L \varrho l A}{m_{mol}}$

2.2. Das Energiebändermodell

2.2.1. *Begründen Sie den Wahrheitswert der folgenden Aussagen!*

(1) Alle Valenzelektronen eines beliebigen Stoffes sind stets frei beweglich.
(2) Bei Metallen gibt es zwischen Valenz- und Leitungsband keine verbotene Zone.
(3) Bei Metallen sind Valenz- und Leitungsband identisch.
(4) Alle Elektronen im Valenzband können durch Energiezufuhr ins Leitungsband gelangen.

2.2.2. *Unterscheiden Sie* die Energiebändermodelle von Metallen, Halbleitern und Isolatoren!

2.3. Allgemeines über die Leitung in Halbleitern

Unterscheiden Sie die folgenden Begriffe!

(1) Eigenleitung – Störstellenleitung
(2) Überschußleitung – Mangelleitung
(3) Donatoren – Akzeptoren
(4) Majoritätsträger – Minoritätsträger
(5) freie Elektronen – Defektelektronen

2.4. Die Eigenleitung

Erklären Sie mit Hilfe des Energiebändermodells die Eigenleitung!

2.5. Die Störstellenleitung

2.5.1. *Erklären Sie* an einem Beispiel die Überschußleitung! Stellen Sie dabei auch das Verhältnis von freien Elektronen und Defektelektronen und die Lage des Störniveaus dar!

2.5.2. *Beschreiben* und *erklären Sie* die Prozesse bei Dotierung von Germanium mit Indium!

2.6. Der pn-Übergang

2.6.1. *Beantworten Sie die folgenden Fragen!*
(1) Was ist ein pn-Übergang?
(2) Was ist die Ursache für das Entstehen einer Grenzschicht?
(3) Wodurch ist die Grenzschicht charakterisiert?
(4) Unter welcher Bedingung wird die Grenzschicht zur Sperrschicht?

2.6.2. *Sprechen Sie* über Aufbau und Wirkungsweise einer Halbleiterdiode!

2.7. Der Transistor

2.7.1. *Erläutern Sie* die Begriffe Basis, Emitter, Kollektor!

2.7.2. *Beschreiben Sie* Aufbau und Wirkungsweise der Emitterschaltung (vgl. Abb. 43.16. und 43.17.)!

3. Übungen zum Thema

3.1. Das Energiebändermodell

Erklären Sie mit Hilfe des Energiebändermodells die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

(1) bei Metallen,
(2) bei Halbleitern!

3.2. Die Bedeutung der Halbleiterbauelemente

Sprechen Sie über die Verwendung von Halbleiterdioden und Transistoren und ihre ökonomische Bedeutung!

4. Textaufgaben

253. Mit welcher Geschwindigkeit bewegen sich die Leitungselektronen in einem Kupferdraht von 1 mm² Querschnittsfläche bei einer Stromstärke von 6 A?
(Die Dichte von Kupfer beträgt $8{,}9 \cdot 10^3$ kg m^{-3}.)

254. Berechnen Sie mit Hilfe der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie und der allgemeinen Zustandsgleichung für einen gegebenen Zustand eines idealen Gases die Wurzel aus der mittleren quadratischen Geschwindigkeit der Wärmebewegung von freien Elektronen bei 27 °C! (Die Masse eines Elektrons ist der 1840. Teil der Masse eines Wasserstoffatoms.)

255. Eine Glühlampe besitzt einen Glühdraht aus Wolfram. Seine Temperatur ist 2500 K. Wie groß ist der spezifische Widerstand bei dieser Temperatur, wenn er bei Normtemperatur $\varrho_0 = 0{,}049\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ beträgt? ($\alpha = 0{,}0041\ \text{K}^{-1}$)

256. Die Feldwicklung eines Elektromotors hat bei 20 °C einen Widerstand von 500 Ω. Welchen Widerstand hat sie im Betrieb bei 62 °C, wenn der Temperaturkoeffizient $\alpha = 0{,}0038\ \text{K}^{-1}$ beträgt?

44. Die elektrische Leitung im Hochvakuum

44.1. Erzeugung von Ladungsträgern im Hochvakuum

Unter einem Hochvakuum verstehen wir einen Raum, der mit einem Gas unter einem Druck von 10^{-1} Pa bis 10^{-5} Pa gefüllt ist. Ein solcher Druck kann ohne Schwierigkeiten mit Hilfe von Vakuumpumpen und Gettern* in einem Gefäß erzeugt werden. Da in einem Hochvakuum keine Ladungsträger vorhanden sind, kann eine elektrische Leitung nur dann stattfinden, wenn durch geeignete Mittel im Hochvakuum Ladungsträger erzeugt werden.
Zur Erzeugung eines elektrischen Stromes durch das Hochvakuum nutzt man den von *T. A. Edison* 1883 entdeckten glühelektrischen Effekt. Er besteht darin, daß ein Material bei genügend hoher Temperatur Elektronen emittiert. Die notwendige Temperatur hängt vom Material ab und verringert sich bei Verkleinerung des Druckes in der Umgebung. Diese Glühemission führt bei Oxiden der Erdalkalimetalle im Hochvakuum bereits bei 1000 K zu einer genügend großen Zahl von freien Elektronen, die als Ladungsträger verwendet werden können.
Auch durch Licht bzw. Strahlung mit kürzeren Wellenlängen und durch hohe Spannungen können im Vakuum Elektronen aus einem Material ausgelöst werden (Photoemission bzw. Feldemission).
Im folgenden werden Anwendungen der elektrischen Leitung im Hochvakuum betrachtet.

* Ein Getter ist eine Substanz, die in einem evakuierten Gefäß durch induktive Erwärmung verdampft und dabei Gasreste chemisch bindet. Dadurch wird das Vakuum verbessert. Dieser Prozeß wird als Gettern bezeichnet.

44.2. Elektronenröhren

Elektronenröhren werden nur noch für besondere Zwecke eingesetzt, z. B. als Hochspannungsgleichrichter und als Senderöhren. Für die Heimelektronik sind sie heute fast ohne Bedeutung. Ihre einfachsten Formen sind die Diode und die Triode.

44.2.1. Die Diode

Die Diode ist ein Hochvakuumgefäß, meistens aus Glas, in dem zwischen zwei Elektroden ein Strom von Elektronen durch das Hochvakuum fließt. Dazu ist die eine Elektrode als Glühkatode ausgebildet. Sie besteht aus einem Heizdraht, der sich in einem Metallrohr befindet, das mit Bariumoxid bedeckt ist (vgl. Abb. 44.1.). Wird die Oxidschicht durch einen Heizstrom im Heizdraht zum Glühen gebracht, so emittiert sie Elektronen in das Vakuum. Die Anode umgibt die Katode (vgl. Abb. 44.2.). Legt man zwischen Katode und Anode eine Gleichspannung wie in Abb. 44.3., so bewegen sich die emittierten Elektronen als Anodenstrom von der Katode zur Anode.

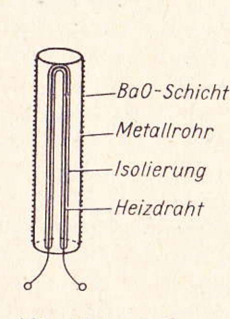


Abb. 44.1. Aufbau einer Glühkatode

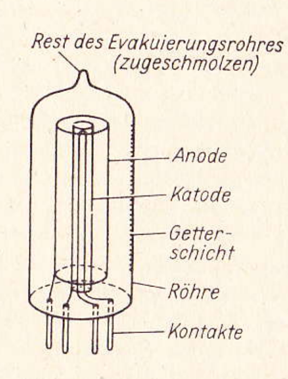


Abb. 44.2. Aufbau einer Diode

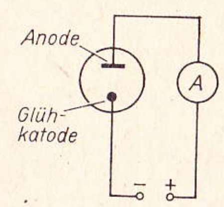


Abb. 44.3. Diode im Stromkreis

Ein Stromfluß ist nur möglich, wenn der negative Pol der Anodenstromquelle an der Glühelektrode und der positive Pol an der kalten Elektrode angeschlossen wird. Ein Strom kann nicht fließen, wenn die Anodenstromquelle umgepolt wird, weil dann die positiv geladene Glühelektrode die emittierten Elektronen festhält.

Die Diode bildet deshalb einen Gleichrichter, der bei Anlegen einer Wechselspannung den Anodenstrom nur während der positiven Halbperiode durch die Röhre fließen läßt. Diese Gleichrichterwirkung der Diode ist in Abb. 44.4. dargestellt.

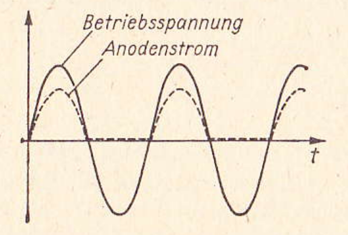


Abb. 44.4. Anodenstrom bei Wechselspannung an der Diode

44.2.2. Die Triode

Der Anodenstrom von der Katode zur Anode läßt sich durch weitere Elektroden steuern, die zwischen Anode und Katode liegen und als Gitter bezeichnet werden. Das heißt, daß er sich in seiner Stärke beeinflussen läßt. Die Triode enthält ein solches Gitter. Es umschließt als schraubenförmiger Draht die Katode (vgl. Abb. 44.5.). Jetzt hängt der Anodenstrom nicht nur von der Anodenspannung zwischen Katode und Anode ab, sondern wird auch von der Spannung zwischen Gitter und Katode beeinflußt, die man als Gitterspannung bezeichnet. Je negativer das Gitter relativ zur Katode ist, desto stärker stößt es die Elektronen elektrostatisch ab, und desto weniger Elektronen können deshalb durch das Gitter hindurch zur Anode gelangen. In einer Schaltung nach Abb. 44.6. läßt sich deshalb der Anodenstrom I_a bei konstanter Betriebsspannung U_b durch Änderung der Gittergleichspannung U_g steuern. Das Gitter ist dabei stets negativ gegenüber der Katode, so daß kein Strom über das Gitter fließen kann. Die Stromquelle zwischen Gitter und Katode gibt deshalb keine Leistung ab, so daß man von der leistungsfreien Steuerung des Anodenstroms spricht.

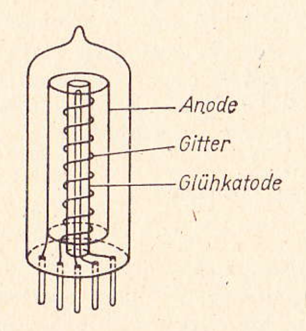


Abb. 44.5. Aufbau einer Triode

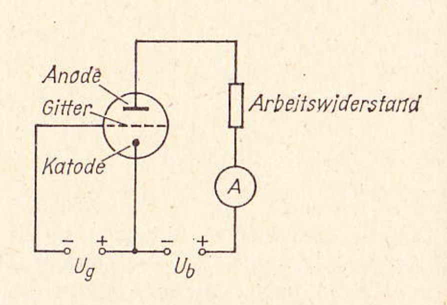


Abb. 44.6. Schaltbild zur Triode

In bestimmten Grenzen ist die Änderung ΔU_g der Gitterspannung direkt proportional zur Änderung ΔI_a des Anodenstroms, die wieder eine proportionale Änderung ΔU des Spannungsabfalls am Arbeitswiderstand hervorruft. Da der Arbeitswiderstand eine Größe von einigen Kiloohm haben kann, ist ΔU viel größer als ΔU_g, so daß eine Spannungsverstärkung vorliegt. In dieser Weise kann eine Triode als Verstärker verwendet werden. Außerdem ist sie für die Erzeugung von ungedämpften elektrischen Schwingungen verwendbar.

44.3. Die Elektronenstrahlröhre

Wenn die Elektronen die Anodenspannung durchlaufen, nehmen sie kinetische Energie auf. Treffen sie mit dieser Energie auf ein Material auf, so wird die Energie in andere Energiearten umgewandelt. So wandelt sich in einer Triode die kinetische Energie der Elektronen in Wärmeenergie um, wenn die Elektronen auf die Anode treffen. Treffen sie mit genügend hoher Geschwindigkeit auf eine Metallplatte auf, so entsteht Röntgenstrahlung (vgl. S. 312ff). Schließlich kann die kinetische Energie der Elektronen auch in Lichtenergie umgewandelt werden. Diese Möglichkeit wird in den Elektronenstrahlröhren genutzt.

Die Wirkung der Elektronenstrahlröhren beruht darauf, daß die Elektronen einen Strahl bilden können, der beim Auftreffen auf einen Leuchtschirm einen kleinen Lichtfleck bildet. Diesen Elektronenstrahl kann man durch elektrische und magnetische Felder ablenken. Im homogenen elektrischen Feld zwischen zwei parallelen Platten wird er zur positiven Platte hin abgelenkt, im magnetischen Feld nach den Gesetzen über die Bewegung eines stromführenden Leiters im Magnetfeld.

Eine Elektronenstrahlröhre kann zur Aufzeichnung von elektrischen Schwingungen im Elektronenstrahloszillografen eingesetzt werden. In ihr wird der Elektronenstrahl durch Spannungen an zwei senkrecht zueinander stehenden Plattenpaaren abgelenkt. Die Ablenkung ist der angelegten Spannung direkt proportional. Die Abb. 44.7. zeigt die Anordnung der Elektroden in einer solchen Röhre.

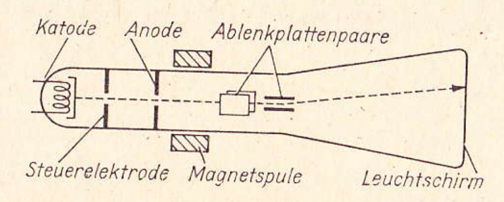


Abb. 44.7. Schema einer Oszillografenröhre

Eine weitere Anwendung der Elektronenstrahlröhre ist die Fernsehbildröhre. Hier wird der Elektronenstrahl zum Aufbau des Bildes zeilenweise über den Leuchtschirm geführt. Dabei muß seine Stärke entsprechend der Helligkeit der einzelnen Bildpunkte gesteuert werden. Das erreicht man mit Hilfe einer Steuerelektrode (sog. *Wehnelt*zylinder), die ähnlich wie das Gitter einer Triode wirkt (vgl. Abb. 44.6.).

Wortliste zum Text

ab/lenken A
auf/zeichnen A
das Barium, o.
die Diode, -n
die Elektronenstrahlröhre, -n
das Erdalkalimetall, -e
die Fernsehbildröhre, -n
der Getter, -
der glühelektrische Effekt, o.
glühen
die Glühkatode, -n
das Hochvakuum, -vakua
der Leuchtschirm, -e
der Lichtfleck, -e
das Oxid, -e
der Rundfunksender, -
die Senderöhre, -n
die Steuerelektrode, -n
umgeben A
umgab, umgeben
um/polen A
der Verstärker, -

Übungen

1. Kontrollfragen zum Text

1) Was versteht man unter einem Hochvakuum?
2) Welchen Zweck hat ein Getter?
3) Wovon hängt die für die Glühemission notwendige Temperatur ab?
4) Wie ist eine Glühkatode aufgebaut?
5) Warum ist eine Diode ein Gleichrichter?
6) Welche Aufgabe hat ein Gitter?
7) Was ist leistungsfreie Steuerung?
8) Welcher Zusammenhang wird bei der Verwendung einer Triode als Verstärker genutzt?
9) Wo werden Elektronenstrahlröhren verwendet?
10) Welche Aufgabe hat der Leuchtschirm in einer Elektronenstrahlröhre?

2. Übungen zum Text

2.1. Ladungsträger im Hochvakuum

Begründen Sie die Notwendigkeit der Erzeugung von Ladungsträgern im Hochvakuum durch den glühelektrischen Effekt!

2.1.2. *Beschreiben Sie* Bau und Wirkungsweise einer Glühkatode!

2.2. Die Diode

Beschreiben Sie Bau und Wirkungsweise einer Diode!

2.3. Die Triode

Beschreiben Sie Bau und Wirkungsweise der Triode!

2.4. Die Elektronenstrahlröhre

Beschreiben Sie Bau und Wirkungsweise der Elektronenstrahlröhre!

3. Übungen zum Thema

3.1. Anwendungen von Diode und Triode

3.1.1. *Sprechen Sie* über die Anwendung der Diode!

3.1.2. *Sprechen Sie* über die Anwendung der Triode als Verstärker!

Anhang

Das Internationale Einheitensystem (SI)

Zur Beschreibung physikalischer Gesetzmäßigkeiten benötigt man physikalische Größen. Durch eine Größe wird ein qualitativ bestimmtes Merkmal eines physikalischen Objektes quantitativ erfaßt. Beispiele für Größen sind die Länge, die Zeit, die Masse und die Kraft. Eine Größe mißt man durch den quantitativen Vergleich dieser Größe mit einer bestimmten Größe der gleichen Art, die als Einheit festgelegt wurde. Man kann deshalb jede Größe als Produkt von Zahlenwert und Einheit darstellen:

Größe = Zahlenwert · Einheit

$$x = \{x\} \cdot [x]$$

Alle benutzten Größen faßt man in einem Größensystem zusammen. Jedes Größensystem besteht aus einer bestimmten Anzahl voneinander unabhängiger Basisgrößen (Grundgrößen) und einer (theoretisch unbegrenzten) Zahl daraus abgeleiteter Größen. Die zu den Größen gehörenden Einheiten bilden ein Einheitensystem, das aus Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten besteht. Im vorliegenden Buch wird das Internationale Einheitensystem (Système International d'Unités, SI) benutzt, das in seiner gegenwärtigen Form 1975 von der 15. CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures = Generalkonferenz für Maß und Gewicht) bestätigt wurde. Dieses System ist in der DDR durch den Standard TGL 31548 verbindlich.
Die Basiseinheiten des SI heißen das Meter (m) für die Länge, das Kilogramm (kg) für die Masse, die Sekunde (s) für die Zeit, das Ampere (A) für die elektrische Stromstärke, das Kelvin (K) für die Temperatur, die Candela (cd) für die Lichtstärke und das Mol (mol) für die Stoffmenge. Neben diesen Basiseinheiten verwendet man noch zwei ergänzende SI-Einheiten. Das sind der Radiant (rad) für den ebenen Winkel und der Steradiant (sr) für den Raumwinkel. Außerdem bezeichnet man auch die Einheiten als SI-Einheiten, die aus den Basiseinheiten kohärent abgeleitet werden. Kohärent abgeleitete Einheiten sind solche Einheiten, die mit den Basiseinheiten (bzw. den ergänzenden Einheiten) durch Einheitengleichungen verknüpft sind, in denen als Zahlenfaktor nur 1 vorkommt.
Eine Tabelle der Basiseinheiten des SI und ihrer Definitionen, der ergänzenden Einheiten und der kohärent abgeleiteten SI-Einheiten mit eigenem Namen befindet sich auf den Seiten 435–437.
Durch die Verwendung von Vorsätzen können dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten gebildet werden. Vorsätze, die gleich einer ganzzahligen Potenz von 1000 sind, also die Form 10^{3n} haben, werden bevorzugt. Es darf jeweils nur ein Vorsatz benutzt werden. Die Vorsätze sind in der Tabelle der SI-Einheiten enthalten.

Einige SI-fremde Einheiten bleiben noch gültig. Das sind Einheiten, die sehr gebräuchlich oder in Spezialgebieten vorteilhaft sind. Beispiele sind das Liter (l) für das Volumen, der Grad (°), die Minute (′) und die Sekunde (″) für den ebenen Winkel, die Minute (min), die Stunde (h) und der Tag (d) für die Zeit, die Tonne (t) für die Masse, das Kilometer je Stunde (km/h) für die Geschwindigkeit und die Kilowattstunde (kWh) für die Energie.
Das SI hat einige Vorteile gegenüber anderen Einheitensystemen:

- Es ist in den Naturwissenschaften und in der Technik universell anwendbar.
- Die Einheiten des SI können mit großer Genauigkeit entsprechend ihren Definitionen dargestellt werden.
- Alle benötigten Einheiten können auf die sieben Basiseinheiten bzw. die ergänzenden Einheiten zurückgeführt werden.
- Die SI-Einheiten sind kohärent, d. h., daß Umrechnungsfaktoren nicht auftreten.

Wegen seines übersichtlichen Aufbaus benutzen immer mehr Staaten dieses System. Dadurch wird der Austausch von wissenschaftlichen Ergebnissen, von technischen Dokumentationen und von Produkten wesentlich vereinfacht.

Übersicht über die SI-Einheiten

1. Basiseinheiten

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Definition der Einheit
Länge	Meter	m	Das Meter ist gleich 1650763,73 Vakuum-Wellenlängen der Strahlung, die dem Übergang zwischen den Niveaus $2p_{10}$ und $5d_5$ des Atoms Krypton 86 entspricht.
Masse	Kilogramm	kg	Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.
Zeit	Sekunde	s	Die Sekunde ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Zäsium 133 entspricht.
Stromstärke	Ampere	A	Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Definition der Einheit
Temperatur	Kelvin	K	Das Kelvin ist der 273,16te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.
Stoffmenge	Mol	mol	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus so vielen gleichartigen elementaren Teilchen besteht, wie Atome in 0,012 kg des Kohlenstoffs 12 enthalten sind.
Lichtstärke	Candela	cd	Die Candela ist die Lichtstärke, die 1/600000 m^2 der Fläche eines schwarzen Körpers bei der Erstarrungstemperatur des Platins beim Druck 101325 Pa senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.

2. Ergänzende SI-Einheiten

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
Ebener Winkel	Radiant	rad	1 rad = 1 m/m
Raumwinkel	Steradiant	sr	1 sr = 1 m^2/m^2

3. Abgeleitete SI-Einheiten mit eigenem Namen

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Beziehung zu anderen SI-Einheiten
Frequenz	Hertz	Hz	1 Hz = 1/s
Kraft	Newton	N	1 N = 1 kg · m/s^2
Druck, Spannung	Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m^2
Energie	Joule	J	1 J = 1 N · m
Leistung	Watt	W	1 W = 1 J/s
Elektrizitätsmenge	Coulomb	C	1 C = 1 A · s
Elektrische Spannung	Volt	V	1 V = 1 W/A
Elektrische Kapazität	Farad	F	1 F = 1 C/V
Elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	1 Ω = 1 V/A
Elektrischer Leitwert	Siemens	S	1 S = 1/Ω
Magnetischer Fluß	Weber	Wb	1 Wb = 1 V · s
Magnetische Flußdichte	Tesla	T	1 T = 1 Wb/m^2
Induktivität	Henry	H	1 H = 1 Wb/A
Lichtstrom	Lumen	lm	1 lm = 1 cd · sr
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	1 lx = 1 lm/m^2

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Beziehung zu anderen SI-Einheiten
Energiedosis	Gray	Gy	1 Gy = 1 J/kg
Aktivität	Becquerel	Bq	1 Bq = 1/s

Alle anderen SI-Einheiten werden aus den Basiseinheiten als Potenzprodukte gebildet, z. B. m/s^2 für die Beschleunigung, kg/m^3 für die Dichte.

4. Vorsätze zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen von Einheiten

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Exa	E	10^{18}	Dezi*	d	10^{-1}
Peta	P	10^{15}	Zenti*	c	10^{-2}
Tera	T	10^{12}	Milli	m	10^{-3}
Giga	G	10^{9}	Mikro	μ	10^{-6}
Mega	M	10^{6}	Nano	n	10^{-9}
Kilo	k	10^{3}	Piko	p	10^{-12}
Hekto*	h	10^{2}	Femto	f	10^{-15}
Deka*	da	10	Atto	a	10^{-18}

* Die Vorsätze *Hekto*, *Deka*, *Dezi* und *Zenti* sind nur dort zu verwenden, wo ihre Benutzung auch bisher üblich war, z. B. *Dekagramm*, *Zentimeter*.

Die wichtigsten Buchstabensymbole

A Fläche, Querschnittsfläche
A Ampere
a Beschleunigung
a_r Radialbeschleunigung
$\bar{a}$ Durchschnittsbeschleunigung

B magnetische Induktion

C Kapazität
C Wärmekapazität
C Coulomb
°C Grad Celsius
c Ausbreitungsgeschwindigkeit, Lichtgeschwindigkeit
c spezifische Wärmekapazität
c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen

d Durchmesser

E Elastizitätsmodul
E elektrische Feldstärke
E Energie
E Urspannung
E_i innere Energie
E_{kin} kinetische Energie
E_{pot} potentielle Energie
E_{rot} Rotationsenergie
e Elementarladung
eV Elektronenvolt

F Kraft
F_G Gleitreibungskraft
F_H Haftreibungskraft
F_N Normalkraft
F_r Radialkraft
F_{RF} Fahrwiderstand
F_T Trägheitskraft
F_Z Zentrifugalkraft
F Farad
f Frequenz
f_E Erregerfrequenz
f_G Grenzfrequenz
f_0 Eigenfrequenz

G Gewicht
G Schubmodul, Torsionsmodul
g Gravitationsfeldstärke, Fallbeschleunigung
g Gramm

H Henry
Hz Hertz
h Höhe
h *Planck*sches Wirkungsquantum
h Stunde

I elektrische Stromstärke, Effektivwert einer Wechselstromstärke
I Impuls
I Stromstärke einer mechanischen Strömung
I_a Anodenstromstärke
I_b Basisstromstärke
I_c Kollektorstromstärke
I_e Erregerstromstärke
i Momentanwert einer Wechselstromstärke
i_{max} Maximalwert einer Wechselstromstärke

J Trägheitsmoment
J Joule

K Kelvin
k Konstante, allgemein
kg Kilogramm
kWh Kilowattstunde

L Drehimpuls
L Induktivität
L und N_L *Loschmidt*sche Konstante, *Loschmidt*sche Zahl
l Länge
l Liter

M Drehmoment, Torsionsmoment
m Masse
m_e Masse eines Elektrons
m_{mol} molare Masse
m Meter

min Minute
mol Mol

N Teilchenzahl eines Stoffes
N Windungszahl
N_e Zahl der Leitungselektronen
N_L und L *Loschmidt*sche Konstante, *Loschmidt*sche Zahl
N Newton
n Stoffmenge
n Drehzahl, Umlaufzahl
$n_{1,2}$ Brechungszahl

P Leistung
P_B Blindleistung
P_{BC} kapazitive Blindleistung
P_{BL} induktive Blindleistung
P_S Scheinleistung
P_W Wirkleistung
Pa Pascal
p Druck
p Momentanleistung
p_k kritischer Druck

Q elektrische Ladung
q Momentanwert einer elektrischen Ladung
q Probeladung
q_s spezifische Schmelzwärme
q_v spezifische Verdampfungswärme

R elektrischer Widerstand
R_i innerer Widerstand
R_v Vorschaltwiderstand
R_0 allgemeine Gaskonstante
r Radius, Abstand

s Abstand
s Weg
s_0 Anfangsweg
s Sekunde

T (absolute, thermodynamische) Temperatur
T Periode, Schwingungsdauer, Umlaufzeit
T_k kritische Temperatur
T Tesla

t Zeit
t Tonne

U elektrische Spannung, Effektivwert einer Wechselspannung, Klemmenspannung
U_b Betriebsspannung
U_{be} Basisspannung
U_{ce} Kollektorspannung
U_G Gerätespannung
U_g Gitterspannung
U_i innerer Spannungsabfall
U_{ind} induzierte Spannung
U_{si} Selbstinduktionsspannung
U_v Spannung am Vorschaltwiderstand
u Momentanwert einer Wechselspannung
u_{max} Maximalwert einer Wechselspannung
u_{si} Momentanwert einer Selbstinduktionsspannung

V Volumen
V Volt
VA Voltampere
v Geschwindigkeit
v_0 Anfangsgeschwindigkeit
$\bar{v}$ Durchschnittsgeschwindigkeit
var Var

W Arbeit
W_A Ablösearbeit
W_B Beschleunigungsarbeit
W_H Hubarbeit
W_m mechanische Arbeit
W_w Wärmeenergie
W Watt
Wb Weber
Ws Wattsekunde

X_C kapazitiver Widerstand
X_L induktiver Widerstand
x Elongation
x_M Amplitude

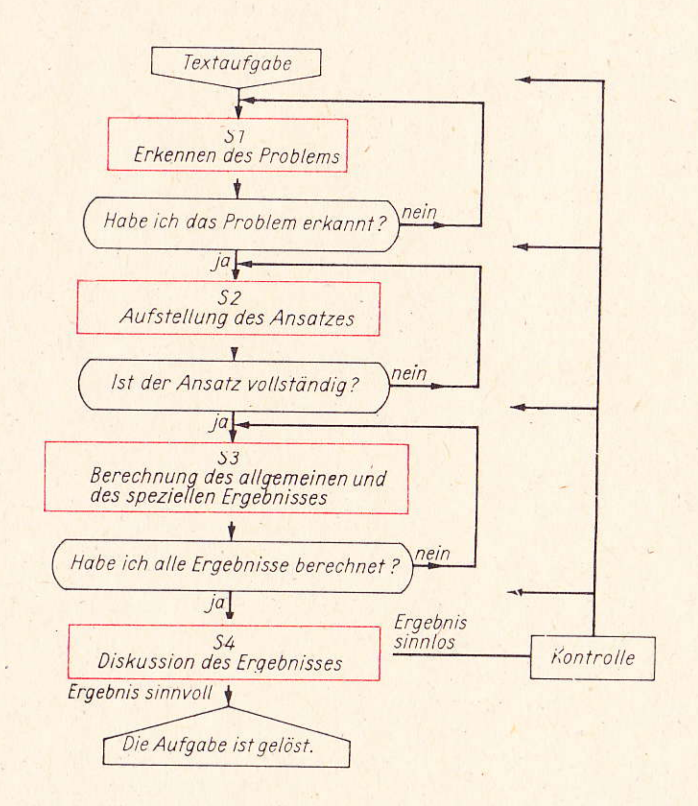
Z Scheinwiderstand

α	Einfallswinkel
α	linearer Ausdehnungskoeffizient
α	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
α	Winkelbeschleunigung
α_R	Reibungswinkel
α'	Reflexionswinkel
β	Brechungswinkel
β	Winkel zwischen elektrischem Leiter und magnetischen Feldlinien
γ	Gravitationskonstante
γ	kubischer Ausdehnungskoeffizient
Δ	Differenz, Änderung
ε_r	relative Dielektrizitätskonstante
ε_0	elektrische Feldkonstante, Influenzkonstante
η	Wirkungsgrad
ϑ	*Celsius*temperatur
$\varkappa$	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten eines Gases
λ	Wellenlänge
μ	Koeffizient der Gleitreibung
μ_F	Fahrwiderstandszahl
μ_R	Koeffizient der Rollreibung
μ_r	relative Permeabilität
μ_0	Haftreibungskoeffizient
μ_0	magnetische Feldkonstante, Induktionskonstante
ϱ	Dichte
ϱ	spezifischer Widerstand
ϱ_ϑ	spezifischer Widerstand bei der *Celsius*temperatur ϑ
ϱ_{20}	spezifischer Widerstand bei 20 °C
σ	mechanische Spannung
Φ	magnetischer Fluß
φ	Drehwinkel
φ	Phasenwinkel, Phasenverschiebung
φ_0	Phasenkonstante
Ω	Ohm
ω	Kreisfrequenz
ω	Winkelgeschwindigkeit

Wichtige physikalische Konstanten

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 2{,}998 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
elektrische Elementarladung	$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
*Planck*sches Wirkungsquantum	$h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$
*Loschmidt*sche Konstante	$L = 6{,}023 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$
Masse eines Elektrons	$m_e = 9{,}108 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
allgemeine Gaskonstante	$R_0 = 8{,}314\ \mathrm{J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}}$
Gravitationskonstante	$\gamma = 6{,}670 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$
elektrische Feldkonstante	$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{A \cdot s \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}}$
magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{V \cdot s \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}}$

Lösungen zu den Textaufgaben



Wärmelehre (Texte 1.–11.)

1.: 292 K (459 K; 258 K; 72 K)
2.: 115 °C (1729 °C; −256 °C; 100 °C; −271 °C)
3.: $\Delta l = 86{,}6 \cdot 10^{-3}$ m
4.: $\Delta l = 2{,}4 \cdot 10^{-1}$ m
5.: $l_2 = 1\,198{,}27$ m
6.: $l_{2_{Al}} - l_{2_{Fe}} = 8{,}8 \cdot 10^{-4}$ m
7.: $V_2 = 93{,}5\ \mathrm{cm^3}$
8.: $d_2 = 60{,}115$ mm; $h_2 = 80{,}15$ mm; $V_2 = 227{,}3\ \mathrm{cm^3}$
9.: $\Delta V = (\gamma_{fl.} - 3\alpha_{fest})\, V_0\, \Delta T = 6{,}94\ \mathrm{cm^3}$
10.: $d = 0{,}195$ mm
11.: $\varrho_{-50} = 2{,}713\ \mathrm{g/cm^3}$
12.: $V_2 = 4290$ l
13.: $V_2 = 86{,}6$ l
14.: $T_2 = 256\ \mathrm{K} = -17\ °\mathrm{C}$

15.: $V_2 = 5{,}33 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3 = 5{,}33\ \mathrm{l}$
16.: $T_2 = 324\ \mathrm{K} = 51\ ^\circ\mathrm{C}$
17.: $V_2 = 4{,}17\ \mathrm{m}^3$
18.: $T_2 = 586\ \mathrm{K} = 313\ ^\circ\mathrm{C}$
19.: $T_1 = 375\ \mathrm{K} = 102\ ^\circ\mathrm{C}$; $T_2 = 525\ \mathrm{K} = 252\ ^\circ\mathrm{C}$
20.: $n = 55{,}6\ \mathrm{mol}$
21.: $m = 585\ \mathrm{g}$
22.: $m = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{g}$
23.: $m = 9{,}5\ \mathrm{kg}$
24.: $p = 7{,}8 \cdot 10^6\ \mathrm{Pa}$
25.: $T = 287\ \mathrm{K} = 14\ ^\circ\mathrm{C}$
26.: $\varrho = 12{,}2\ \mathrm{kg\ m^{-3}}$
27.: $C = 2{,}59 \cdot 10^2\ \mathrm{J/K}$
28.: $W = 145\ \mathrm{kJ}$
29.: $c = 0{,}388\ \mathrm{kJ/kg\ K}$
30.: $m_2 = 82{,}7\ \mathrm{kg}$
31.: $\vartheta_M = 47\ ^\circ\mathrm{C}$
32.: $c_1 = 390\ \mathrm{J/kg\ K}$
33.: $C = 52{,}3\ \mathrm{J/K}$
34.: $W = 6{,}51 \cdot 10^4\ \mathrm{J}$
35.: $W = 2{,}56 \cdot 10^7\ \mathrm{J}$
36.: $W = 1{,}146 \cdot 10^8\ \mathrm{J}$
37.: $W = 1{,}37 \cdot 10^6\ \mathrm{J}$
38.: $m = 0{,}251\ \mathrm{kg}$; $\vartheta_{H_2O} = 0\ ^\circ\mathrm{C}$
39.: $m = 131\ \mathrm{kg}$
40.: $m = 114{,}8\ \mathrm{g}$
41.: $m = 4{,}74 \cdot 10^{-1}\ \mathrm{kg}$
42.: $\Delta T = 0{,}069\ \mathrm{K}$
43.: $\Delta T = 0{,}425\ \mathrm{K}$
44.: $\vartheta_2 = 50\ ^\circ\mathrm{C}$; $p_2 = 8{,}66 \cdot 10^6\ \mathrm{Pa}$
45.: $W = 4{,}76 \cdot 10^4\ \mathrm{J}$
46.: $\vartheta_2 = 61{,}9\ ^\circ\mathrm{C}$
47.: $W = 5{,}59 \cdot 10^5\ \mathrm{J}$
48.: $W = 3{,}38 \cdot 10^7\ \mathrm{J}$
49.: $W = 4{,}42 \cdot 10^7\ \mathrm{J}$
50.: $W = 1{,}54 \cdot 10^5\ \mathrm{J}$; $V_2 = 2{,}9\ \mathrm{m}^3$; $p_2 = 3{,}59 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$

Bei den Aufgaben 44. bis 50. muß man die Gleichungen des Textes 8. mit der allgemeinen Zustandsgleichung für das ideale Gas verbinden!

51.: $\eta = 0{,}42$
52.: $\eta = 0{,}254$
53.: $N = 3{,}35 \cdot 10^8$
54.: $W = 0{,}76\ \mathrm{J}$
55.: O_2: $\sqrt{\overline{v^2}} = 478\ \mathrm{m/s}$; H_2: $\sqrt{\overline{v^2}} = 1910\ \mathrm{m/s}$; I_2: $\sqrt{\overline{v^2}} = 169{,}5\ \mathrm{m/s}$
56.: $\frac{E_i}{N} = 4{,}14 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{J}$; $p = 1{,}38 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Pa}$

Elektrik (Texte 12.–19.)

57.: (1) $44\ \Omega$; (2) $100\ \mathrm{V}$, (3) $110\ \Omega$, (4) $0{,}2\ \mathrm{A}$; (5) $6000\ \mathrm{A}$; (6) $220\ \mathrm{V}$
58.: $4{,}54\ \mathrm{A}$
59.: mindestens $22\ \Omega$
60.: $250\ \mathrm{V}$
61.: $6{,}26\ \Omega$
62.: $119\ \mathrm{m}$
63.: $0{,}024\ \frac{\Omega\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$
64.: Der Widerstand vergrößert sich um 44%.
65.: (1) $d_{Al} : d_{Cu} = 1{,}17 : 1 = 1 : 0{,}855$
(2) $m_{Al} : m_{Cu} = 1 : 3{,}54 = 0{,}282 : 1$
66.: $0{,}145\ \frac{\Omega\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$
67.: $0{,}00625\ \mathrm{K}^{-1}$
68.: (1) $1100\ \mathrm{W}$, (2) $0{,}2\ \mathrm{W}$, (3) $440\ \mathrm{MW}$; (4) $3{,}6\ \mathrm{W}$, (5) $3{,}6\ \mathrm{MW}$, (6) $331\ \mathrm{W}$
69.: (1) $0{,}114\ \mathrm{A}$, (2) $0{,}182\ \mathrm{A}$, (3) $0{,}273\ \mathrm{A}$, (4) $0{,}341\ \mathrm{A}$, (5) $0{,}454\ \mathrm{A}$
70.: $74{,}5\ \mathrm{W}$
71.: 138 Mrd. kWh
72.: $9700\ \mathrm{MW}$
73.: $21\ \mathrm{W}$
74.: $113\ \mathrm{kJ}$
75.: $15\ \Omega$

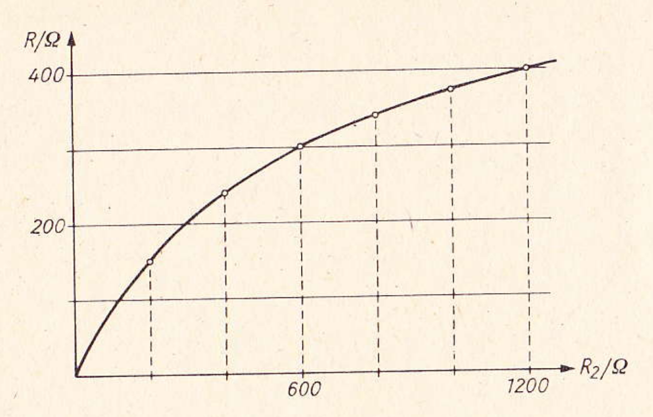
Tabelle zu 76.

	U	R_1	R_2	R	I_1	I_2	I
(1)	6 V	3 Ω	6 Ω	2 Ω	2 A	1 A	3 A
(2)	220 V	644 Ω	484 Ω	276 Ω	0,342 A	0,454 A	0,796 A
(3)	380 V	20 Ω	20 Ω	10 Ω	19 A	19 A	38 A
(4)	250 V	18 kΩ	27 kΩ	10,8 kΩ	13,9 mA	9,3 mA	23,2 mA
(5)	6 V	0,5 Ω	1,5 Ω	0,375 Ω	12 A	4 A	16 A

77.: $I_1 = 0{,}454\ \mathrm{A}$, $I_2 = 0{,}91\ \mathrm{A}$, $I = 1{,}36\ \mathrm{A}$, $R = 162\ \Omega$
78.: 4 : 1
79.: $500\ \Omega$
80.: (1) $12{,}5\ \Omega$ parallel, (2) $4950\ \Omega$ in Reihe, (3) $0{,}0200\ \Omega$ parallel,
(4) $24{,}95\ \mathrm{k}\Omega$ in Reihe, (5) $249{,}95\ \mathrm{k}\Omega$ in Reihe
81.: $360\ \Omega$
82.: $R = \frac{R_2 \cdot 600\ \Omega}{R_2 + 600\ \Omega}$

Tabelle zu 82.

R_2/Ω	R/Ω
0	0
200	150
400	240
600	300
800	343
1 000	375
1 200	400



83.: 28 Ω
84.: 2,79 V
85.: (1)11,05 V; (2) 160 A
86.: $R_x = 5\,\Omega$; $R_{AB_0} = 6{,}67\,\Omega$; $R_{AB_\infty} = 7{,}5\,\Omega$
87.: 8,6 %
88.: (1) 0,9 mΩ; (2) 143 A, (3) 0,129 V
89.: (1) 500 V/mm; (2) 25 V/mm, (3) 125 V/mm ; (4) 2000 V/mm; (5) 5000 V/mm
90.: (1) $2 \cdot 10^8$ V; (2) 11 000 V/m; (3) 84500 V/m
91.: $6{,}24 \cdot 10^{12}$
92.: 25 mN
93.: negativ,3 Elementarladungen
94.: (1) $2 \cdot 10^{-3}$ C; (2) 100 mV; (3) 500 μF; (4) $5 \cdot 10^{-10}$ C
95.: 2,5
96.: in Parallelschaltung; 1,88 J
97.: 8000 V
98.: (1) 278 pF; 139 μC; (2) 6 nF; 3 mC
99.: 502 pF
100.: $Q_0 = C_0 U_0$ und $E_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2$
(1) Spannung konstant; Kapazität halbiert
$U_1 = U_0$, $C_1 = \frac{1}{2}C_0$, $Q_1 = \frac{1}{2}Q_0$, $E_1 = \frac{1}{2}E_0$
Die verrichtete Arbeit erhöht die Energie der Stromquelle.
(2) Ladung konstant; Kapazität halbiert
$Q_2 = Q_0$, $C_2 = \frac{1}{2}C_0$, $U_2 = 2U_0$, $E_2 = 2E_0$
Die verrichtete Arbeit erhöht die Energie am Kondensator.
101.: 464 pF
102.: 7200 F!!!
103.: (1) 2,51 T, (2) 255 mA, (3) 15900
104.: mittlere Feldlinienlänge = 0,24 m
$\mu_r = 5720$
105.: 0,0108 T
106.: 320 N
107.: Anziehungskraft
(1) 10^{-4} N, (2) $2 \cdot 10^{-7}$ N
Der Querschnitt der Leiter wird vernachlässigt.

108.: (1) 37; (2) 220 V, (3) 76; (4) 12,1 V
109.: 0,26 H
110.: 6470
111.: $5 \cdot 10^{-5}$ Wb
112.: (1) 0,30 V; (2) 0,030 Wb
113.: $U_i = N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$; $N = 1$, $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A$; $\Delta A = l\Delta s$

$$U_i = \frac{Bl\Delta s}{\Delta t} = Blv$$

114.: 1970 V
115.: $E_m + E_{el} = \text{konstant}$
$\Delta E_m = -\Delta E_{el}$
$W_m = -W_{el}$
$F \cdot \Delta s = -U_i I_i \cdot \Delta t$
$I_i l B \cdot \Delta s = -U_i I_i \cdot \Delta t$
$B \cdot \Delta A = -U_i \cdot \Delta t$

Mechanik (Texte 20.–34.)

116.: $t = 2$ h 45 min
117.: $v = 10\ \text{ms}^{-1}$; $a = 2{,}5\ \text{ms}^{-2}$
118.: $a = 0{,}4\ \text{ms}^{-2}$; $v_0 = 3{,}8\ \text{ms}^{-1}$
119.: $a_{An} = 0{,}6\ \text{ms}^{-2}$; $s_{An} = 30$ m; $t_B = 16{,}7$ s; $a_B = -0{,}36\ \text{ms}^{-2}$
120.: $t = 17{,}27$ s; $s = 336$ m
121.: –
122.: $h = \dfrac{g}{2}t^2$, $t = \sqrt{\dfrac{2h}{g}}$, $v = \sqrt{2gh}$
123.: $t_{T_1} = 1{,}344$ s; $h_1(t_{T_1}) = 4{,}56$ m, $t_{s_1} \approx 1$ s, $t_{s_2} \approx 1{,}5$ s
124.: $v = 0{,}79\ \text{ms}^{-1}$, $\omega = 0{,}314\ \text{s}^{-1}$

Tabelle zu 125.

r/m	v/ms^{-1}	ω/s^{-1}	a_r/ms^{-2}
2	2	1	2
2	3,5	1,75	6,12
0,5	4	8	32
0,62	4	6,5	25,8
3	4,5	1,5	0,75
4	6	1,5	0,56

126.: $\omega_{Erde} = 7{,}27 \cdot 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$; $v_{Ä} = 1{,}67 \cdot 10^3\ \text{km h}^{-1}$, $v_{52°} = 1{,}03 \cdot 10^3\ \text{km h}^{-1}$
127.: $n = 2390\ \text{min}^{-1}$
128.: $n = 5683\ \text{min}^{-1}$
129.: $x = 3{,}67$ cm
130.: $F = 4162$ N

131.: $G_1 = 1255$ N, $G_2 = 2442$ N
132.: $F_1 = F_2 = 882,9$ N, $F_3 = 870,1$ N
133.: $F_H = 65433$ N
134.: $G = 401,2$ N
135.: $l = 360$ cm, $G = 392,4$ N
136.: $M_{max} = 9,56$ N
137.: $F_1 = 775$ N, $F_2 = 618$ N
138.: $F = 1079$ N
139.: $F = F_A = 912,3$ N; $F_B = 1864$ N
140.: $R = 38357$ N; $R_v = 38160$ N; $R_h = 3433$ N
141.: $F_B = 8181$ N; $F_A = 12419$ N
142.: $F = 196,2$ N

Tabelle zu 143.

t/s	v/km h^{-1}	a/ms^{-2}	m/kg	F/N
2	20	2,77	180	498,6
3	40	3,70	250	925
3	60	5,55	200	1110
10	60	1,66	800	1328
12	40	0,92	600	552
16	20	0,34	1000	340

144.: $F = 1395$ N; $s = 85$ m; $v = 17$ ms^{-1}
145.: $t = 15,3$ s
146.: $F_1 = 885,8$ N; $F_2 = 585,6$ N
147.: $F_r = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$
148.: $F_r = 15,8$ N
149.: $v = 7,9$ kmh^{-1}
150.: $F_r = 3944$ N; $n_{max} = 436$ min^{-1}
151.: $2\alpha = 145,4°$
152.: $d = 12,42$ cm
153.: $g' = 7,53$ ms^{-2}
154.: 1,63 N
155.: $g = \frac{\gamma m}{r^2}$
156.: $h = 35820$ km
157.: $g' = 275$ ms^{-2}
158.: $r_1 = 346000$ km
159.: $W = 1,72 \cdot 10^6$ Nm
160.: $F_x = 9,81$ N
161.: $W = 1,6 \cdot 10^8$ Nm
162.: $P_{ab} = 1198,8$ W; $\eta = 0,647$
163.: $P_{zu} = 40,5$ kW
164.: $h = \frac{5}{2} r$

165.: 694440 Nm
166.: $h = 5,10$ m
167.: $v_1 = 7,64$ ms^{-1}; $v_2 = 3,06$ ms^{-1}; $v_1' = 9,04$ ms^{-1}
$v_2' = 5,71$ ms^{-1}

Schwingungen und Wellen (Texte 28.–34.)

168.: $\omega = 1,8$ s^{-1}
169.: $z = 4,27$
170.: $x = 1,36$ cm
171.: $t = 0,0027$ s
172.: $m = 3,58$ kg
173.: $T = 0,4$ s; $f = 2,5$ Hz; $\varphi = 270°$
174.: a) $T = 2$ s; b) $T = 2,83$ s; c) $T = 0,063$ s
175.: $l = 38,8$ m
176.: $l = 1$ m
177.: $T = 0,5(T_1 + T_2)$; $z = 51,9$
178.: Die Verkürzung beträgt 13,4%.
179.: $f = 13,5$ Hz
180.: $\lambda = 461$ m
181.: $f = 0,625$ Hz
182.: $f = 3,33$ Hz
183.: 100 Wellenlängen
184.: $s = 299,5$ m
185.: $\beta = 19,5°$
186.: $\alpha = 50,4°$
187.: $T = 1,24 \cdot 10^{-2}$ s
188.: $L = 844$ H
189.: $f = 1,06 \cdot 10^6$ Hz
190.: $C = 50,7$ nF
191.: $T = 3,75 \cdot 10^{-3}$ s
192.: $f_1 = 6 \cdot 10^4$ Hz, Langwelle; $f_3 = 6 \cdot 10^{14}$ Hz, sichtbares Licht
$f_2 = 1,5 \cdot 10^9$ Hz, Mikrowelle; $f_4 = 3 \cdot 10^{17}$ Hz, Röntgenwelle
193.: $\lambda_1 = 3,75 \cdot 10^{-13}$ m, Gammastrahlen
$\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-8}$ m, ultraviolette Strahlung
$\lambda_3 = 3 \cdot 10^2$ m, Mittelwelle
194.: a) $\varphi_a = 80°$; aus Fläche 1
b) $\varphi_b = 45,2°$; aus Fläche 3
c) $\varphi_c = 80°$; aus Fläche 2
195.: $\varphi = 33,7°$; aus der Hypotenusenfläche
196.: $d = 27,4$ m
197.: a) $\sin\gamma = \frac{1}{n}$; n mindestens gleich 1,41;
b) $\alpha_{max} = 61,3°$
198.: $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ mm

199.: $\lambda = 6{,}8 \cdot 10^{-4}$ mm
200.: $W = 3{,}38 \cdot 10^{-19}$ J $= 2{,}1$ eV
201.: $\lambda = 678$ nm
202.: $\lambda = 181$ nm

Fortsetzung Mechanik (Texte 35.–39.)

203.: Die Normalkomponenten von F und G tragen zur Reibungskraft bei.

$$F = G\frac{\mu_0 \cos\alpha + \sin\alpha}{\cos\alpha - \mu_0 \sin\alpha} = G\frac{\mu_0 + \tan\alpha}{1 - \mu_0 \tan\alpha}$$

204.: $h = \dfrac{b}{2\mu_0} = 1{,}67$ m
205.: Kippen erfolgt, wenn der Vektor $\vec{G}$ durch die Kippkante verläuft.

$$h = \frac{b}{\mu_0} = 1{,}43 \cdot b$$

206.: (1.) 696 N (2.) 1160 N
207.: Rechtsdrehung: $F = \dfrac{F_B\, a + F_B\, \mu\, c}{l}$

Linksdrehung: $F = \dfrac{F_B\, a - F_B\, \mu\, c}{l}$

208.: $\alpha = 16{,}7°$
209.: $E = 1{,}95 \cdot 10^5$ N/mm²
210.: $h = 1$ mm
211.: $\sigma = p = 2{,}4 \cdot 10^8$ Pa
212.: Aus der zu übertragenden Leistung und dem Richtmoment D des Stabes folgt

$$\alpha = \frac{P}{D \cdot \omega}; \quad \alpha = 0{,}00078 = 2{,}7'$$

213.: Für den Verdrillungswinkel α folgt

$$\alpha = \frac{4lRF}{\pi \cdot G \cdot r^4}; \quad \alpha = \frac{1}{5\pi} = 3{,}6°$$

214.: $h = 5{,}54 \cdot 10^3$ m
215.: $h = 1{,}90$ m
216.: $p = 5{,}28 \cdot 10^4$ Pa
217.: $\Delta h = 1{,}09$ m
218.: $F = \dfrac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p = 2{,}63 \cdot 10^4$ N
219.: $\varrho_{Holz} = 0{,}467$ g/cm³
220.: $m_{Kork} = 5{,}3$ kg
221.: $v = 2{,}55$ m/s
222.: $d_2 = 5{,}66$ cm
223.: Aus der Kontinuitätsgleichung und der Gleichung von *Bernoulli* (beachte: kein Höhenunterschied) folgt:

$$v_1 = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\varrho} \cdot \frac{2}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}$$

224.: $v = 240$ km/h
225.: $h = 0{,}458$ m
226.: $h = h_1 + \dfrac{v_1^2}{2g}$
227.: $v = 1{,}21$ cm/s
228.: $J = 22{,}19$ kg m²
229.: $J_x = \dfrac{3}{10}$ m r²
230.: $d = 1{,}30$ m
231.: $\varrho = \dfrac{2J}{\pi \cdot d(r_1^4 - r_2^4)} = 2{,}8$ g/cm³ (Aluminium)
232.: $E_{rot} = 6{,}854 \cdot 10^5$ J
233.: $t = 145$ s
234.: $M = 100$ Nm
235.: $r\omega = v = \sqrt{\dfrac{10\,gh}{7}}$
236.: Mit $\omega = \alpha \cdot t$ und dem Grundgesetz für Drehbewegungen erhält man $t = 21{,}4$ s, und daraus ergibt sich die Zahl der noch stattfindenden Umdrehungen zu $z = 53{,}5$.

Fortsetzung Elektrik (Texte 40.–44.)

237.: (1) 310 V; (2) ±96 V; (3) −310 V
238.: 355 V
239.: (1) 28,6 mH; (2) 24,9 mH; (3) 14,0 H; (4) $1{,}59 \cdot 10^{-6}$ H
240.: (1) 0,138 A; (2) 40 nF; (3) 600 kHz; (4) 2 mV
241.: (1) 7,1 V; (2) 5,78 mA
242.: $Z = 1125\,\Omega$; $I = 0{,}196$ A; $U_R = U_C = 156$ V; $\varphi = -45°$
243.: $L = 9{,}55$ mH; $\varphi = 36{,}8°$
244.: 16,7 µF
245.: $I = 3{,}18$ A; $\varphi = 88{,}2°$; $f = 1000$ Hz
246.: $U_{L_{max}} = U_{C_{max}} = 220$ V
247.: (1) 0,536 A; (2) 4 µF; (3) parallel; 4 µF, 900 V
248.: (1) 1000 W; (2) 484 var; (3) 220 var; (4) 152 var
249.: $P_s = 380$ kVA; $P_w = 342$ kW; $P_B = 166$ kvar
250.: $\varphi_1 = +36{,}8°$; $\varphi_2 = -36{,}8°$
251.: 64,4 µF
252.: (1) 79,6 kvar; (2) 1,75 mF; (3) $I_1 - I_2 = 117$ A
253.: $4{,}43 \cdot 10^{-4}$ m s⁻¹
254.: $1{,}17 \cdot 10^5$ m s⁻¹
255.: 0,418 Ω mm² m⁻¹
256.: 580 Ω

Sachwortverzeichnis für Physik

Sachwortverzeichnis für Grammatik

Die Anordnung der Sachworte erfolgt in der Reihenfolge des erstmaligen Auftretens im Text.